
Bachelorarbeit

Herr
Kenny Ziller

**Entwurf, Implementierung
und Überprüfung einer
Software zur Bestimmung
von raumakustischen
Eigenschaften nach DIN
EN 60268-16:2011**

2016

Bachelorarbeit

Entwurf, Implementierung und Überprüfung einer Software zur Bestimmung von raumakustischen Eigenschaften nach DIN EN 60268-16:2011

Autor:

Herr Kenny Ziller

Studiengang:

Media and Acoustical Engineering

Bachelor Thesis

Conception, Implementation and Evaluation of Software for Determination on room acoustical properties according to the standard DIN EN 60268-16:2011

author:

Mr. Kenny Ziller

course of studies:

Media and Acoustical Engineering

Bibliografische Angaben

Ziller, Kenny

Entwurf, Implementierung und Überprüfung einer Software zur Bestimmung von raumakustischen Eigenschaften nach DIN EN 60268-16:2011

Conception, Implementation and Evaluation of Software for Determination on room acoustical properties according to the standard DIN EN 60268-16:2011

77 Seiten, Hochschule Mittweida, University of Applied Sciences, Fakultät Medien, Bachelorarbeit, 2016

Abstract

Die vorliegende Bachelorarbeit hat das Ziel eine experimentelle Software zum Messen der Sprachverständlichkeit zu entwickeln. Dazu wurde über die DIN Norm 60268-16:2011 eine Software erstellt. Um diese Software zu validieren, wurden praxisnahe Messungen durchgeführt und mit Produkten der Firma embedded Acoustics B.V. verglichen.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	III
Formelverzeichnis.....	IV
Abbildungsverzeichnis	VI
Tabellenverzeichnis	VII
1. Grundlagen	1
1.1 Einleitung	1
1.2 Theoretische Grundlagen zum Hören.....	2
1.2.1 Aufbau des Gehörs	2
1.2.2 Parameter die genaues Hören beeinflussen.....	2
1.3 Grundlagen von LabView	4
1.4 Grundlagen der Sprachverständlichkeit aus DIN Norm 60268-16:2011	5
1.4.1 Anwendung des STI.....	5
1.4.2 Theoretischer Überblick	7
1.4.3 Messung des STI	9
1.4.4 Direkte Methode.....	11
1.4.5 Indirekte Methode	12
1.4.6 Das Prüfsignal.....	13
1.5 Stand der Technik	14
1.6 Der Software-Entwicklungsprozess	18
1.7 Grundlagen eines Lastenheftes.....	18
2. Schreiben eines Lastenheftes.....	19
3. Entwurf der Software auf Grundlage der DIN EN 60268-16:2011	21
3.1 Aufbau der experimentellen Software.....	21
3.2 Experimentelle Benutzeroberfläche.....	23
4. Implementierung des Entwurfs	24
4.1 Erzeugen des Prüfsignals	24
4.2 Verbindung von LabView und SAMURAI mittels TCP	25
4.3 Auswertung des gemessenen Signals.....	26

4.4 Berechnung des STI mittels LabView.....	28
5. Testen der experimentellen Software	30
5.1 Messaufbau	30
5.2 Messergebnisse	32
5.2.1 Messungen bei SINUS Messtechnik GmbH	33
5.2.2 Messungen im Hörsaal N001 der HTWK Leipzig.....	37
5.3 Auswertung der Messungen.....	39
5.4 Vergleich der Ergebnisse mit auf dem Markt erhältlichen Messgeräten.....	40
5.4.1 Messungen bei SINUS Messtechnik GmbH	40
5.4.2 Messungen im Hörsaal N001 der HTWK Leipzig.....	41
5.4.3 Detaillierter Vergleich einer Messung	41
5.5 Ergebnisse der Messungen.....	44
6. Zusammenfassung.....	45
6.1 Verfassen eines Benutzerhandbuches	45
6.1.1 Installation der Software.....	45
6.1.2 Einstellungsmöglichkeiten des Programms	45
6.1.3 Ausführen einer STI Messung	47
6.2 Fazit	47
Literaturverzeichnis	VIII
Anhang A: Tabellarische Übersicht der verschiedenen Messsysteme aus 1.5	IX
Anhang B: Grenzen des Speech Transmission Index	X
Anhang C: Berechnung des STI.....	XII
Anhang D: Programmablaufplan.....	XVII
Anhang E: Blockdiagramm zur Erzeugung des Prüfsignals.....	XVIII
Anhang F: Blockdiagramm der TCP Verbindung.....	XIX
Anhang G: Bilder des Messaufbaus	XX
Eigenständigkeitserklärung	XXIV

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
CIS	Common Intelligibility Scale
DIN	Deutsches Institut für Normung
RASTI	Room Acoustics Speech Transmission Index
STI	Speech Transmission index
STIEL	Speech Transmission Index for Telecommunication Systems
STIPA	Speech Transmission Index for Public Address Systems
TCP	Transmission Control Protocol

Formelverzeichnis

ART_k	absolute Sprachrezeptionsschwelle für Oktavband k
$amdB$	vom Oktavpegel abhängiger Wert für die Hörverdeckung
amf	pegelabhängiger Hörverdeckungsfaktor
CIS	Common Intelligibility Scale
C_{50}	Deutlichkeitsmaß
C_{80}	Klarheitsmaß (Durchsichtigkeit)
E_N	nützliche Energie der Impulsantwort
E_S	störende Energie der Impulsantwort
e	Eulersche Zahl
f_m	Modulationsfrequenz
$g(t)$	Impulsantwort
$h_k(t)$	Impulsantwort von Oktavband k
$I_{am,k}$	Intensität der Verdeckung in Oktavband k
I_k	Intensitätspegel der Oktave k
$I_{rt,k}$	Intensität der Rezeptionsschwelle in Oktavband k
j	imaginäre Zahl
L	Schallpegel
$L_{addiert}$	addierter Pegel
$L_{eq,Signal}$	aquivalenter Dauerschallsignalpegel
$L_{eq,Stör}$	aquivalenter Dauerschallstörpegel
L_k	Gesamtschalldruckpegel der Oktave k
$MTI_{\alpha,k}$	MTI-Wert mit Bewertungsfaktor
$MTI_{\beta,k}$	MTI-Wert mit Redundanzfaktor
MTI_k	Modulations-Übertragungsindex für Oktave k
m	Index der Modulationsfrequenz
$m(f)$	Modulation über eine Frequenz
mdr_{k,f_m}	Modulationstiefe des empfangenen Prüfsignals für Oktavband k und Modulationsfrequenz f_m
mdt_{k,f_m}	Modulationstiefe des übertragenen Prüfsignals für Oktavband k und Modulationsfrequenz f_m
$m_i(f)$	eingegangener Modulationsgrad
$m_o(f)$	ausgespielter Modulationsgrad
$m_k(f_m)$	abgeleiteter Modulationsübertragungswert für Oktavband k und

	Modulationsfrequenz f_m
m'_{k,f_m}	korrigierter Modulationsübertragungswert für Oktavband k und Modulationsfrequenz f_m
$SNR_{eff,k,f}$	effektives Signal-Rausch-Verhältnis
SNR_{eff}	effektives Signal Rausch Verhältnis
SNR_k	Signal Rausch Verhältnis einer Oktave k
STI	Speech Transmission Index
TI_{k,f_m}	Übertragungsindex für jedes Oktavband
α_k	Bewertungsfaktor für Oktavband k
β_k	Redundanzfaktor zwischen Oktavband k und Oktavband k+1
n	Anzahl der Modulationsfrequenzen je Oktavband
t	Zeit
π	Kreiszahl Pi

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufbau des Gehörs.....	2
Abbildung 2: Konzept der Modulationsreduktion über einen Übertragungskanal	8
Abbildung 3: Interface der App AudioTools	16
Abbildung 4: Screenshot der SAMURAI Messung.....	22
Abbildung 5: : Funktion für die Amplitudenmodulation mit Modulationsfrequenz.....	24
Abbildung 6: Blockdiagramm der STIPA Prüfsignal Auswertung	28
Abbildung 7: Benutzeroberfläche der experimentellen Software.....	46
Abbildung 8: Programmablaufplan vor Beginn der Implementierung	XVII
Abbildung 9: Blockdiagramm zur Erzeugung des Prüfsignals.....	XVIII
Abbildung 10: Blockdiagramm der TCP Verbindung.....	XIX
Abbildung 11: Abstand der Messmikrofone	XX
Abbildung 12: Messaufbau mit Geithain Monitor, an Messposition 1	XX
Abbildung 13: Grobe Skizze zum Messaufbau	XXI
Abbildung 14: Hörsaal N001 der HTWK Leipzig	XXI

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vergleich der ST-Verfahren im Hinblick auf unterschiedliche Verzerrungsarte	6
Tabelle 2: Modulationsfrequenzen des STIPA-Verfahrens	9
Tabelle 3: Modulationsfrequenzen des STITEL-Verfahrens	10
Tabelle 4: Anwendbarkeit der verschiedenen direkten STI Verfahren	12
Tabelle 5: Wertung des STI im Vergleich zur CIS-Skala	15
Tabelle 6: gemessener Störgeräuschpegel während der Messungen bei SINUS Messtechnik	32
Tabelle 7: gemessener Störgeräuschpegel während der Messungen im Hörsaal N001 der HTWK Leipzig	32
Tabelle 8: Messwerte im Vergleich aus Messreihe Eins	33
Tabelle 9: Messwerte im Vergleich aus Messreihe Zwei	34
Tabelle 10: Messwerte im Vergleich aus Messreihe Drei	35
Tabelle 11: Messwerte im Vergleich aus Messreihe Vier	36
Tabelle 12: Messergebnisse aus HTWK-Messung Eins	37
Tabelle 13: Messergebnisse aus HTWK-Messung Zwei	38
Tabelle 14: Messergebnisse aus HTWK-Messung Drei	39
Tabelle 15: Unterschiede der gemessenen <i>Leq</i> Pegel	42
Tabelle 16: Unterschiede der MTF-Matrix	43
Tabelle 17: Unterschiede der Berechnung des Bedrock SM50 und der experimentellen Software	44
Tabelle 18: Vergleich der Vorgestellten Messsysteme aus 1.3	IX
Tabelle 19: Hörverdeckung als Funktion des Oktavbandpegels	XIII
Tabelle 20: Absolute Sprachrezeptionsschwelle in Oktavbändern	XIV
Tabelle 21: Oktavband-Bewertungsfaktoren für männliche und weibliche Sprecher	XVI
Tabelle 22: Modulationsfrequenzen der ersten STIPA-Ähnlichen Messung	XXII
Tabelle 23: Modulationsfrequenzen der zweiten STIPA-Ähnlichen Messung	XXII
Tabelle 24: Modulationsfrequenzen der dritten STIPA-Ähnlichen Messung	XXII
Tabelle 25: : Modulationsfrequenzen der vierten STIPA-Ähnlichen Messung	XXIII
Tabelle 26: Modulationsfrequenzen der fünften STIPA-Ähnlichen Messung	XXIII
Tabelle 27: Modulationsfrequenzen der sechsten STIPA-Ähnlichen Messung	XXIII
Tabelle 28: Modulationsfrequenzen der siebten STIPA-Ähnlichen Messung	XXIII

1. Grundlagen

1.1 Einleitung

Sprache gilt als das wichtigste Kommunikationsmittel der Menschen. Daher ist es umso wichtiger, dass Gesprochenes auch verstanden wird. Probleme treten auf, sobald Sprachübertragungen, sei es über elektroakustische Anlagen, Telekommunikationswege oder direkte Sprache, nicht verstanden werden. Doch was kann dagegen getan werden? Ein großer Bereich der Psychoakustik befasst sich mit den Phänomenen der Sprachverständlichkeit. Da sich das Gehör von Mensch zu Mensch unterscheidet ist es äußerst schwierig objektiv zu sagen, wann die Verständlichkeit perfekt ist. Daher wird bei allen Parametern von einem gesunden, durchschnittlichen Gehör ausgegangen. Ein gesundes Gehör besitzt keinerlei Beeinträchtigungen in seiner Hörleistung. Der Luftschallweg sowie der Knochenleitungsweg und alle Haarzellen der Gehörschnecke funktionieren im Bereich der zu erwartenden Leistung. Viele Parameter bestimmen, ob das Gesprochene verstanden werden kann. Diese Faktoren können zum Beispiel die zeitliche Verdeckung oder die Maskierung von Geräuschen sein. Klare Verständlichkeit liegt aus diesem Grund nicht nur am Sender der akustischen Information, sondern auch beim Empfänger. Für ein objektives Maß wurde der Speech Transmission Index erfunden. Dieser Wert gibt wieder, wie gut die Sprachverständlichkeit eines Übertragungskanal ist. Durch den STI können auch elektrische Beschallungsanlagen getestet werden. Er dient also nicht nur zur Bewertung eines menschlichen Sprechers in einem Raum. Hierbei sind vor allem Alarmanlagen mit Sprachausgabe von großer Bedeutung. Ein Alarmsignal, wie eine Hupe oder eine Sirene erfüllen zwar auch ihren Zweck, jedoch sind Sprachanweisungen um ein Vielfaches effektiver, da sie eine besser verständliche Information ausgeben. Besonders an Orten mit einem ständig wechselnden Personenkreis ist eine Sprachausgabe äußerst vorteilhaft, da so die Lage auch von ortsfremden Personen schneller verstanden werden kann.

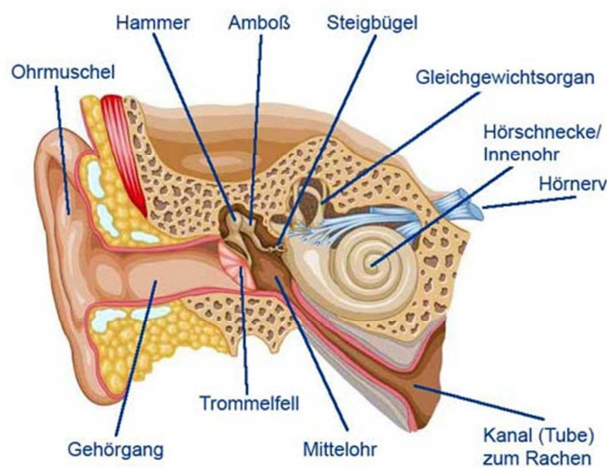
Die folgende Bachelorarbeit soll dazu dienen, der Firma SINUS Messtechnik GmbH eine Grundlage für eine Software bereitzustellen, welche genau diesen Index misst und auswertet. Dabei beschäftigt die Arbeit sich vor allem mit den Grundlagen des STI sowie der Entwicklung der Software. Ein weiterer wichtiger Punkt der Arbeit ist die Validierung der später getesteten Messungen.

1.2 Theoretische Grundlagen zum Hören

1.2.1 Aufbau des Gehörs

Das Ohr wandelt eine Luftschwingung in elektrische Signale für das Hirn um. Dabei treffen die schwingenden Luftpartikel auf das Trommelfell, welches dadurch wiederum zum Schwingen angeregt wird. Die Gehörknöchelchen (Hammer, Steigbügel, Amboss), welche fest mit dem Trommelfell verbunden sind, leiten die Oszillation in die Flüssigkeit der Cochlea, welche dadurch wiederum die feinen Haarzellen anregt. Je nachdem welche Haarzellen angeregt werden, wird ein elektrisches Signal ans Hirn weiter gegeben.

Abbildung 1: Aufbau des Gehörs[1]



1.2.2 Parameter die genaues Hören beeinflussen

Das Hören ist ein komplexer Prozess, daher gibt es viele Parameter die das Hören beeinflussen. Diese sind zum Beispiel:

- Maskierung / Verdeckung
- die Lautheit
- Verzerrungen aller Art (beschrieben in Anhang B)
- Klarheitsmaß C_{80}
- Deutlichkeitsmaß C_{50}

Verdeckung

Ein wichtiger Faktor der Sprachverständlichkeit ist die Verdeckung. Diese Größe wird auch im Rechenverfahren des STI berücksichtigt und spielt eine große Rolle für den endgültigen Wert. In der Akustik unterscheidet man zwischen zwei Arten der Verdeckung. Die Verdeckung im Frequenzbereich, welche auch als Maskierung bezeichnet wird, und die Verdeckung im Zeitbereich.

Die Maskierung beschreibt ein Verdecken von Sinustönen durch weißes Schmalbandrauschen in benachbarten Frequenzgruppen. Der schmalbandige Geräuschanteil wirkt in den Sinuston hinein. Dadurch wird der Sinuston durch das weiße Rauschen verdeckt. Der überdeckte Anteil muss mit einem höheren Schallpegel wiedergegeben werden, um wahrgenommen zu werden. Dieses Prinzip wird als so genannte Mithörschwelle beschrieben. [2] [3]

Für die Verdeckung im Zeitbereich gibt es drei Unterteilungen. Die Vorverdeckung, die Simultanverdeckung, sowie die Nachverdeckung. Von Vorverdeckung spricht man, wenn ein lauterer Geräusch ein nachfolgendes leises Geräusch überdeckt. Bei einer Simultanverdeckung werden das Verdeckende und das verdeckte Geräusch zeitgleich abgespielt. Als Nachverdeckung wird bezeichnet, wenn ein lautes Geräusch ein zuvor wiedergegebenes Geräusch verdeckt. Besonders im Falle der Nachverdeckung darf der Abstand zwischen den zwei Tönen maximal 200ms betragen.[3]

Klarheitsmaß C_{80} und Deutlichkeitsmaß C_{50}

Ein wichtiger Faktor für die Verständlichkeit von Sprache ist der Nachhall. Vielfach bestätigter Erfahrung nach wird der Direktschall verstärkt durch den Rückwurf. Solange die zeitliche Abweichung von eintreffendem Direktschall und eintreffendem, indirekten Schall gering ist, wirkt sich dieser positiv auf die Sprachverständlichkeit aus. Der Übergang von „positivem“ Rückwurf und „negativem“ Rückwurf ist hierbei fließend. Für eine objektivere Einschätzung wurden das Klarheitsmaß (oder auch Durchsichtigkeit) und das Deutlichkeitsmaß eingeführt. Diese werden über die in der Impulsantwort erhaltene Energie definiert. [4]

$$E_N = \int_0^{t_0} [g(t)]^2 dt \quad (1.1)$$

$$E_S = \int_{t_0}^{\infty} [g(t)]^2 dt \quad (1.2)$$

Dabei ist E_N die Energie des nützlichen Anteils und E_S die Energie des störenden Anteils. $g(t)$ ist die bei t_0 einsetzende Impulsantwort. Klarheitsmaß und Deutlichkeitsmaß berechnen sich wie folgt:

$$C_{80} = 10 \lg\left(\frac{E_N}{E_S}\right) dB \quad (1.3)$$

$$C_{50} = \frac{E_N}{E_N + E_S} \quad (1.4)$$

Für das Klarheitsmaß werden Werte von -3dB bis 0dB als günstig angesehen. Für das Deutlichkeitsmaß sollten Werte ab 0,5 angestrebt werden, um eine 90-prozentige Silbenverständlichkeit zu gewährleisten. [4]

1.3 Grundlagen von LabView

LabView ist eine Entwicklungsumgebung welche speziell für Ingenieure, Techniker und Wissenschaftler entwickelt wurde. Es soll die Produktivität von Anwendern steigern. Anders als die für Informatiker entwickelten Programmiersprachen, besteht LabView aus einer grafischen Benutzeroberfläche. Programmiert wird in der grafischen Programmiersprache. Aus diesem Grund lässt es sich intuitiver bedienen. Die Benutzeroberfläche ist individuell gestaltbar. Grundsätzlich besteht diese jedoch aus zwei Teilen. Der erste Teil ist das so genannte „Front Panel“ in diesem werden die einzelnen Bausteine des Programms grafisch hinzugefügt. Der zweite Teil ist das „Block Diagramm“. In diesem werden die grafischen Bausteine über logische Verbindungen miteinander verknüpft. [6]

Eine große Kompatibilität zu anderer Software macht es zu einem weitreichend nutzbaren Programm. Einen weiteren großen Vorteil bietet LabView, da es mit zahlreichen Hardwarekomponenten benutzt werden kann.

Zu den weitreichenden Anwendungsmöglichkeiten zählen unter Anderem: die Messgerätsteuerung, die Automatisierung von Prüf- und Validierungssystemen, die Datenerfassung und Signalverarbeitung und vieles mehr. [6]

Um die experimentelle Software für raumakustische Messungen in SAMURAI zu implementieren, wird als Grundlage LabView genutzt. In Anhang E und F befinden sich Bilder zur Dokumentation.

1.4 Grundlagen der Sprachverständlichkeit aus DIN Norm 60268-16:2011

1.4.1 Anwendung des STI

Für die Messung der Sprachverständlichkeit wird die DIN Norm DIN EN 60268-16 herangezogen. Diese Norm beschreibt Verfahren zur Messung unterschiedlicher Sprachverständlichkeitsindizes. Vier Messmethoden werden genauer beschrieben. Dies sind:

- STI (Speech Transmission Index)
- STITEL (Speech Transmission Index for Telecommunication Systems, Sprachübertragungsindex für Telekommunikationsanlagen)
- STIPA (Speech Transmission Index for Public Address Systems; Sprachübertragungsindex für Beschallungsanlagen)
- RASTI (Room Acoustics Speech Transmission Index, Raum akustischer Sprachübertragungsindex)

Die ersten drei Verfahren sind die heute angewandten Methoden, der RASTI ist veraltet und es wird empfohlen, diesen nicht mehr zu nutzen. Dieser bezieht die STI-Werte lediglich aus zwei Oktavbändern (550Hz und 200 Hz) und darum haben sich bei der Prüfung von elektroakustischen Anlagen erhebliche Einschränkungen ergeben. Daher wird im Umfang dieses Dokuments auch nicht weiter darauf eingegangen. STI, STIPA und STITEL werden im Folgenden genauer beschrieben. Der folgende Abschnitt bezieht sich hierbei auf DIN EN 60268-16:2011. Der STI und seine abgewandelten Messmethoden soll vor allem dazu dienen die Verständlichkeit von Sprache in ein objektives Maß zu wandeln. Es sollen Vorhersagen über die Übertragung von Sprache über einen Übertragungskanal gemacht werden können. [6]

Anwendungsbereiche für den STI sind unter anderem:

- Messung von Beschallungsanlagen
- Messung und Zertifizierung von Sprachalarm- und Notfallsystemen
- Messungen von Sprachkommunikation in Räumen
- Beurteilung der potentiellen Verständlichkeit von Hörhilfen

Die Anwender des STI sind hierbei: Akustiker, Installateure von Beschallungsanlagen, Hersteller von Audio- und Telekommunikationsgeräten, Zertifizierer von Sprachalarm- und anderen Notfallsystemen. [6]

Für verschiedene Verzerrungsarten lassen sich die unterschiedlichen Methoden jeweils nur bedingt anwenden. Die folgende Tabelle zeigt, welche Messmethode verwendet werden kann, falls unterschiedliche Verzerrungsarten vorliegen [6]:

Tabelle 1: Vergleich der ST-Verfahren im Hinblick auf unterschiedliche Verzerrungsarten [6]

Verfahren	Art der Verzerrung			
	Rauschen	Nachhall, Echos	Nichtlineare Verzerrung	Spektrale Verzerrung
direkter, vollständiger STI	ja	ja	situationsabhängig	ja
direkt, STIPA	ja	ja	situationsabhängig	ja
direkt, STITEL	ja	situationsabhängig	situationsabhängig	ja
indirekt, vollständiger STI, Anwendung von MLS	ja	ja	nein	ja
indirekt, vollständiger STI, Anwendung von Gleitsinussignalen (Sweep)	nein	ja	nein	ja

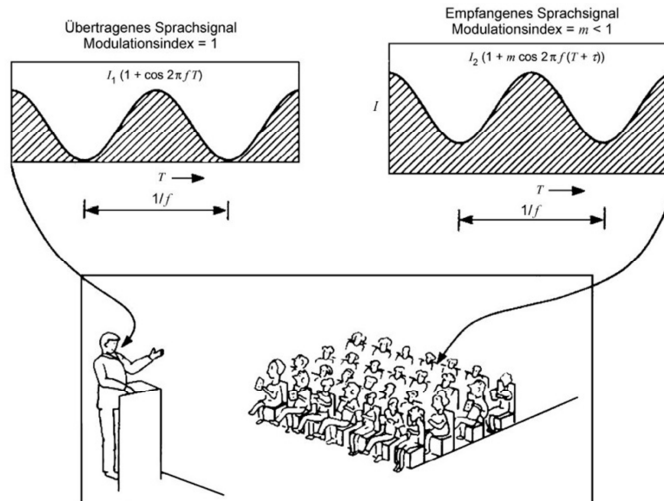
Anhand dieser Tabelle lässt sich gut erkennen, dass besonders der direkte STI sowie der direkte STIPA für die meisten Arten der Verzerrung geeignet sind. Lediglich für nichtlineare Verzerrungen sind sie nicht vollständig anwendbar. Der Begriff situationsabhängig wird hierbei verwendet um auszudrücken, dass für diese spezielle Situation das jeweilige Messverfahren ausreichend genaue Ergebnisse liefern kann. Als Beispiel lässt sich der direkte STIPA für Beschallungsanlagen mit nichtlinearen Verzerrungskomponenten verwenden. Jedoch nur, wenn dieses Signal nicht in verschiedenen Frequenzbändern stark begrenzt ist. [6]

1.4.2 Theoretischer Überblick

Die Informationen dieses Kapitels beziehen sich auf die DIN EN 60268:16:2011. Die Grundlage des STI findet sich in der Sprache. Sprachsignale weisen eine Schwankung der Intensität auf. Diese Schwankung führt zu einer Schwankung der Intensitätshüllkurve. Diese Schwankungen tragen den relevantesten Teil der Informationen hinsichtlich der Sprachverständlichkeit. Für eine STI-Messung werden die Änderungen der Modulation über einen bestimmten Übertragungskanal analysiert. Aus dieser Analyse ergibt sich der Wert der Sprachverständlichkeit in einem Bereich von 0-1. Dabei gibt der Wert Eins eine identische Modulation am Empfänger wie am Sender an.

Die eben beschriebenen Schwankungen beruhen in der Sprache auf der Trennung von Sätzen, Wörtern und Phonemen. Die Abschwächung des Modulationssignals führt zur Abschwächung der Sprachverständlichkeit. Diese Abschwächung zeigt sich durch eine Verringerung der Modulationstiefe der Modulationsfrequenzen in den unterschiedlich gemessenen Oktavbändern. Die Modulationsfrequenzen beim Sprechen beginnen normalerweise bei ca. 0,5Hz und erstrecken sich bis 16Hz. Während einer STI Messung werden die Modulationsfrequenzen von 0,63 bis 12,5Hz moduliert und gemessen.

Abbildung 2: Konzept der Modulationsreduktion über einen Übertragungskanal [6]



Das Prüfsignal des direkten STI ist ein modulierte rosa Rauschen. Das rosa Rauschen wird dabei in seinen Oktavbändern moduliert. Für einen vollständigen STI werden 7 Oktavbänder mit jeweils 14 Modulationsfrequenzen moduliert. Das Ergebnis der Analyse sind 98 verschiedene Werte, welche in einer Matrix dargestellt werden.

Für eine Messung wird dieses Prüfsignal in einen Raum eingespielt. Je nach Anwendung wird dies hierbei über einen Lautsprecher, welcher einen menschlichen Sprecher simuliert, einer Beschallungsanlage oder einem Notfallwarnsystem wieder gegeben. Über einen Übertragungskanal (z. B. ein Hörsaal) gelangt das Signal nun zu einem in beliebiger Hörerposition befindlichen Messmikrofon. Wesentliche Eigenschaften der Schallquelle sind deren Größe, Richtwirkung, Position, Schalldruckpegel und Frequenzgang.

Die nun gemessene Modulationsreduktion bei Frequenz f_m wird durch die Modulationsübertragungsfunktion $m(f_m)$ dargestellt. Die Berechnung lautet wie folgt:

$$m(f) = \frac{m_o(f)}{m_i(f)} \quad (1.5)$$

Dabei ist $m_o(f)$ die ausgegebene Modulation (also die Modulationsfrequenzen 0,63Hz bis 12,5Hz) und $m_i(f)$ beschreibt die Modulationstiefe am Messmikrofon. Diese Modulationsübertragungsfunktion wird durch das effektive Signal-Rausch-Verhältnis interpretiert. Die Gleichung für diesen Wert lautet:

$$SNR_{eff} = 10 \lg \left(\frac{m(f)}{1-m(f)} \right) \quad (1.6)$$

Dieser Wert wird auf einen Bereich von -15dB bis 15dB begrenzt.

1.4.3 Messung des STI

Wie bereits in vorherigen Kapiteln beschrieben, gibt es verschiedene Wege den STI oder seine Unterformen zu messen. Er kann sowohl direkt als auch indirekt gemessen werden (siehe Kapitel 1.4.4 und 1.4.5). Weiterhin gibt es noch die Messmethoden STIPA und STITEL. Einen weiteren Unterscheidungsfaktor bietet die Ein- und Ausspeisung der Signale an der Quelle sowie dem Empfänger. Im Folgenden sollen kurz die Unterformen des STI sowie die Arten der Ein- und Ausspeisung erklärt werden. Dem direkten und indirekten Verfahren wird jeweils ein eigenes Kapitel gewidmet.

Der STI wird aus einem kompletten Satz von 98 Modulationsindizes gebildet. Dafür wird jede der zu messenden Oktavbänder mit jeder Modulationsfrequenz moduliert. Daraus ergibt sich eine Messdauer von ungefähr 15 Minuten, da jedes Signal ca. 10s gespielt werden sollte. Das direkte und vollständige STI Verfahren wird nur selten in der Praxis angewandt, denn diese Messungen dauern zu lang. Für den STIPA wird nicht jedes Oktavband mit jeder Modulationsfrequenz moduliert. Die Oktavbänder werden jeweils mit zwei vordefinierten Modulationsfrequenzen moduliert. Somit gibt es nur 14 verschiedene Messsignale und 14 Modulationsindizes. Alle Signale werden zeitgleich abgespielt, dadurch kommt es zu einer erheblich verkürzten Messdauer von 10 – 15 Sekunden.

Tabelle 2: Modulationsfrequenzen des STIPA-Verfahrens [6]

Oktavband in Hz	125	250	500	1000	2000	4000	8000
erste							
Modulationsfrequenz	1,60	1,00	0,63	2,00	1,25	0,80	2,50
in Hz							
zweite							
Modulationsfrequenz	8,00	5,00	3,15	10,0	6,25	4,00	12,5
in Hz							

Bei Messungen mit dem STITEL Verfahren wird das Messsignal noch weiter vereinfacht. Hierbei wird jedes Oktavband mit nur einer Modulationsfrequenz belegt. Alle Oktavbänder werden zeitgleich abgespielt. Dadurch entsteht eine Messdauer von 10 – 15 Sekunden. Dies ist jedoch das empfindlichste der Messverfahren und bei dessen Anwendung sollten erhebliche Vorsichtsmaßnahmen getroffen werden.

Tabelle 3: Modulationsfrequenzen des STITEL-Verfahrens [6]

Oktavband in Hz	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Modulationsfrequenz in Hz	1,12	11,33	0,71	2,83	6,97	1,78	4,53

Ein weiterer Unterschied der Messverfahren ist die unterschiedliche Ausspielung und Einspeisung der Prüfsignale. So können Signale sowohl elektrisch als auch akustisch eingespeist oder ausgespielt werden.

Für die akustische Einspeisung sind einige Dinge zu beachten. Es wird empfohlen, einen speziellen Lautsprecher zu verwenden, wie zum Beispiel einen künstlichen Mund. Die Vorgehensweise ist wie folgt:

1. Überprüfen der Integrität, zum Beispiel mittels einer Schleifenprüfung (vor allem wichtig wenn das Prüfsignal per CD-Player wieder gegeben wird)
2. Überprüfen ob der Terzfrequenzgang des Lautsprechers bei Messungen im Freifeld innerhalb von ± 1 dB über dem geforderten Sprachfrequenzbereich liegt
3. Der Lautsprecher ist in Hinsicht der entsprechenden Sprecherposition aufzustellen und in dem Winkel auszurichten, in welchem sich der Sprecher zum Hörer befinden würde.
4. Der Prüfsignalpegel ist auf den Betriebsschallpegel einzustellen. Die Einstellung für diesen Pegel werden in DIN EN 60268-16 in Anhang J beschrieben.

Für die akustische Ausspielung ist zu beachten, dass das Messgerät in Hinsicht auf Empfindlichkeit sowie Frequenzgang kalibriert ist. Die Messungen werden dann in einer entsprechenden Hörerposition durchgeführt.

Die Vorgehensweise der elektrischen Einspeisung ist gleich der Vorgehensweise der akustischen Einspeisung, jedoch sollte als Einspeisepunkt eine Position möglichst nahe dem Signaleingang gewählt werden. Außerdem ist das Prüfsignal so einzustellen,

dass es dem Sprachpegel dieser Stelle entspricht. Die Bestimmung des Sprachpegels wird in DIN EN 60268-2011 beschrieben.

Für die elektrische Ausspielung müssen am Messgerät alle Höreffekte, wie zum Beispiel Verdeckung ausgeschaltet werden, da am elektrischen Ausgang keine akustischen Bedingungen beteiligt sind.

Die Norm beschreibt einige Beispiele für Kombinationen von Einspeisungen und Ausspielungen, zum Beispiel [6]:

- akustische Einspeisung – akustische Ausspielung (normale STI Messung)
- elektrische Einspeisung – elektrische Ausspielung (zur Beurteilung von kabelgebundenen und kabellosen Kommunikationssystemen)
- akustische Einspeisung – elektrische Ausspielung (zur Beurteilung von Mikrofonen)
- elektrische Einspeisung – akustische Ausspielung (zur Beurteilung von Beschallungsanlagen)

Die Grenzen einer STI Messung werden in Anhang B beschrieben.

1.4.4 Direkte Methode

Bei der direkten Methode werden wie beschrieben, Prüfsignale über einen Übertragungskanal gemessen. Diese Prüfsignale sind Rauschen in welchem die Oktavbänder von 125Hz bis 8kHz mit Frequenzen von 0,63Hz bis 12,5Hz moduliert sind. Für die verschiedenen Methoden STI, STIPA und STITEL ergeben sich unterschiedliche Messzeiten sowie unterschiedliche Anwendungsbereiche. In der folgenden Tabelle befindet sich eine Zusammenfassung für welche Situationen sich welche Methode eignet:

Tabelle 4: Anwendbarkeit der verschiedenen direkten STI Verfahren [6]

Anwendung	Empfohlene Prüfung	Vollständiger STI ^a	STIPA	STITEL	Grenzen	Alternative Lösung
Einschätzung der Eignung der Raumakustik für Sprachkommunikation (keine elektronische Verstärkung)	STIPA	++	++	+/-	Eignung von STITEL hängt vom Nachhall ab	
Beurteilung von Beschallungs- und Sprachalarmanlagen	STIPA	+	++	+/-	Eignung von STITEL hängt vom Nachhall und Echos ab	
Beurteilung von Telekommunikationskanälen (Telefon, Funk)	STITEL	+	+	++	STITEL besitzt größere Diagnoseleistung	
Kanal zeigt Amplituden-Kompression	STIPA	+	+	+		
Unterschied zwischen männlichen und weiblichen Stimmen erfordert besondere Aufmerksamkeit	Vollständiger STI	++	-	+	STIPA nicht für das weibliche Spektrum geeignet (nur für das männliche)	
Starke Übergangsverzerrung	keine	-	-	-		keine
Stark schwankende Geräusche	STIPA	+/-	+/-	+/-		Durchführung mehrerer STI-Messungen
Sprache und Geräusche sind räumlich deutlich getrennt, oder ein starker Direktschallanteil existiert in einer stark nachhallenden Umgebung	STI	+	+/-	+/-	Mit Vorsicht anzuwenden. Derzeit sind die genormten Verfahren ungenau.	Siehe 7.10
Kanäle, die keine künstlichen Prüfsignale zulassen, wie z. B. Vocoder	keine	+/-	+/-	+/-	Derzeit sind die genormten Verfahren ungenau.	^b Verwendung eines sprachbasierten STI-Prüfsignals oder Hörer-Tests
<p>++ sehr gut geeignetes Verfahren; + gut geeignetes Verfahren; +/- geeignetes Verfahren; - kein geeignetes Verfahren</p> <p>^a Siehe Tabelle 1 für geeignete Messverfahren.</p> <p>^b Hierbei handelt es sich um ein direktes Verfahren, das in einer zukünftigen Ergänzung der Norm einbezogen werden kann.</p>						

1.4.5 Indirekte Methode

Die Modulationsübertragungsfunktion, welche als Grundlage der STI Berechnung dient, kann auch durch die Impulsantwort eines Übertragungskanals berechnet werden. Hierbei wird das Schroeder-Verfahren angewendet. Zur Berechnung der Modulationsfrequenz $m_k(f_m)$ sollte die folgende als Schroeder-Gleichung bekannte Formel angewendet werden [6]:

$$m_k(f_m) = \frac{\left| \int_0^\infty h_k(t) e^{-j2\pi f_m t} dt \right|}{\int_0^\infty h_k(t)^2 dt} \cdot \left[1 + 10^{-SNR_k/10} \right]^{-1} \quad (1.7)$$

Dabei ist:

$h_k(t)$ die Impulsantwort von Oktavband k ,

f_m die Modulationsfrequenz,

SNR_k der Signal-Rausch-Abstand in dB.

Das indirekte Verfahren kann auch auf die vereinfachten Formen des STI (STIPA und STITEL) angewendet werden. Da die Messzeit hier jedoch sehr gering ist, wird empfohlen, den kompletten STI zu messen. Für die der Impulsantwort abgeleiteten STIPA-Werte sind als STIPA(IR) zu kennzeichnen.

Für indirekte Messungen werden im Normalfall „störgeräuschfreie“ Messungen verwendet. Diese werden dann in der Nachbearbeitung um die Auswirkungen des Hintergrundgeräusches und des Sprachpegels korrigiert. Jedoch gibt es auch Methoden die eine Messung mit Störgeräusch ermöglichen. Dies ist zum Beispiel eine indirekte Messung mit einem sprachförmigen MLS Signal ohne Mittelwertbildung.

1.4.6 Das Prüfsignal

Für die Messung des STI wird ein spezielles Prüfsignal verwendet, welches die grundlegenden Eigenschaften der Sprache simulieren soll. Die Grundlage hierfür bildet ein Rosa Rauschen. Dieses Rosa Rauschen wird mit sieben Bandpässen mit den Mittenfrequenzen der Oktaven von 125 Hz bis 8kHz gefiltert. Jeder dieser Filter ist eine halbe Oktave breit. Diese gefilterten Signale werden nun mit folgendem Signal amplitudenmoduliert:

$$mf_m(t) = \sqrt{0,5 \cdot (1 + m \cdot \cos(2\pi f_m t))} \quad (1.8)$$

Die Variable m stellt hierbei die Modulationstiefe dar. Diese sollte Maximal sein und damit dem Wert 1 entsprechen. f_m ist die Modulationsfrequenz.

1.5 Stand der Technik

Die DIN Norm DIN EN 60268-16:2011 ist die aktuellste Version für Messungen und Berechnungen eines STI Wertes. Eingeführt wurde der STI in den 1970er Jahren und wurde seitdem kontinuierlich weiter entwickelt. Bisher wurde die Norm viermal überarbeitet. Diese Überarbeitungen waren wie folgt:

Im Jahre 1988 wurde nur ein geschlechterunabhängiges Prüfspektrum genutzt um den STI zu ermitteln. Mit der nächsten Überarbeitung, zehn Jahre später, wurden die geschlechterspezifischen Prüfsignale eingeführt. Darüber hinaus wurde ein Redundanzfaktor eingeführt. Die folgende Überarbeitung fand im Jahr 2003 statt und wies zum ersten Mal das Prüfverfahren des STIPA und das Einbeziehen pegelabhängiger Verdeckungsfaktoren auf. Die vierte Überarbeitung ist die in dieser Bachelorarbeit genutzte Fassung. Veränderungen zur vorherigen Fassung sind zum Beispiel, dass der RASTI nicht weiterhin genutzt werden soll, Anmerkungen zu den Grenzen des STI Verfahrens und eine Verbesserung des STI Modells im Hinblick auf pegelabhängige Verdeckungsfunktionen. [6]

Im Laufe der Jahre haben verschiedene Anbieter Messsysteme entwickelt, die auf der DIN EN 60268-16 basieren. Im Folgenden werden vier dieser Messsysteme kurz erläutert.

XL2 STIPA Analysator von NTi-Audio

. Ein Messgerät wird von der Firma NTi-Audio angeboten. Dies ist der XL2 STIPA Analysator. Das Gerät dient zur Messung der Sprachverständlichkeit von Durchsagesystemen und Evakuierungsanlagen. Wie bereits aus dem Namen zu erkennen ist, nutzt der Analysator das in der DIN EN 60268-16 beschriebene STIPA-Verfahren, um die Verständlichkeit der Sprache zu analysieren. Hierbei wird der STI-Wert in einer so genannten CIS-Skala angegeben. Diese Skala gibt abhängig vom gemessenen STI- Wert ein Ergebnis zwischen Null und Eins an. Dabei ist Eins ein perfekter Wert und steht für eine ausgezeichnete Sprachverständlichkeit. Null bildet das Gegenteil und steht für unverständlich. Die nachfolgende Tabelle zeigt das Beispiel einer CIS-Skala. [6]

Tabelle 5: Wertung des STI im Vergleich zur CIS-Skala [8]

Wertung	STI	CIS
unverständlich	0 – 0,29	0 – 0,47
schwach	0,3 – 0,44	0,48 – 0,64
angemessen	0,45 – 0,59	0,64 – 0,77
gut	0,6 – 0,74	0,78 – 0,87
ausgezeichnet	0,75 - 1	0,88 - 1

Die Skala berechnet sich wie folgt [9]:

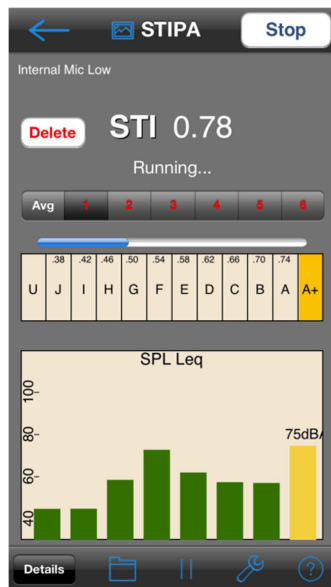
$$CIS = 1 + \log(STI) \quad (1.9)$$

Diese Skala wurde von P.W. Barnett in "The Common Intelligibility Scale" und Overview of speech intelligibility" beschrieben.[10] Da sie logarithmisch den STI bewertet, ist sie besser an das menschliche Empfinden angepasst, denn der berechnete STI-Wert liegt einer linearen Bewertung zugrunde.

Weiterhin zeigt der Analysator die Modulationswerte und die Schallpegel der gemessenen Oktavbänder an. Es ist möglich, die Messwerte der Sprachverständlichkeit mit dem Spektrum des Umgebungslärms zu korrigieren. Für die Messung wird eine NTi Audio TalkBox, ein Minirator MR-PRO (Signalgenerator) oder eine CD mit dem STIPA Testsignal verwendet. Für die TalkBox muss ein Audiosystem mit Einsprechmikrofon vorhanden sein. Der Signalgenerator und die CD brauchen lediglich ein Audiosystem, an welchem nicht zwangsweise ein Einsprechmikrofon vorhanden sein muss. Durch mehrere Messungen kann der Analysator einen Mittelwert berechnen. Ist die Berechnung abgeschlossen werden die Ergebnisse mittels eines Berichts dokumentiert. Dieser Bericht entspricht der DIN EN 60268 und der VDE 0833.

AudioTools, App von Studio Six Digitalis

Abbildung 3: Interface der App AudioTools [11]



Auch Hersteller von Apps für Smartphones haben ein Programm zur Messung des STIPA bereitgestellt. Die US-Amerikanische Firma Studio Six Digitalis bietet eine solche App für Audiotestmessungen. Eine Funktion der Applikation ist die Messung des STIPA nach DIN EN 60268. Dadurch soll es möglich sein, auch mit günstigen Mitteln eine Sprachverständlichkeitsmessung durchzuführen. Sie ist ausschließlich für iOS verfügbar. Für derartige Messungen mit dem Smartphone werden spezielle Mikrofone angeboten, die sich über den Lightninganschluss des iPhones mit dem Smartphone verbinden lassen.

Über das Interface der App lässt sich die Messung starten. Daraufhin kann man die Signalpegel der einzelnen Oktavbänder sowie eine STIPA Auswertung mithilfe der Qualifikationsbänder (siehe dafür DIN EN 60269 Anhang F, S. 54) auf dem Display des Smartphones einsehen. Das Testsignal lässt sich auf der Website der App downloaden. Es wird empfohlen dieses Signal auf eine CD zu brennen und dann per Audioanlage ab zu spielen. [11]

Type 7841 DIRAC Room Acoustics Software von Brüel & Kjær

Die dänische Firma Brüel & Kjær bietet eine Software und eine Soundbox zur Messung des STI an. Dabei handelt es sich zum einen um die Software DIRAC und die Echo Speech Source. Für eine Messung gibt die Echo Speech Source ein kalibriertes Messsignal aus. Es besteht die Möglichkeit den Pegel dieses Messsignal anzuheben, um auch bei lauten Störgeräuschen einen STI Messen zu können. DIRAC erkennt

dabei den erhöhten Pegel und errechnet automatisch eine Korrektur. Die Soundbox kann sowohl mit einem Testsignal mit männlichem Sprecher und 60 dB(A) in 1m Entfernung betrieben werden als auch mit einem Rosa MLS Signal. Weitere Eigenschaften der Soundbox sind: kabellose Steuerung über die DIRAC-Software, Ausgabeverhalten eines menschlichen Mundes und der Batteriebetrieb. Die DIRAC Software kann hierbei den STI sowohl für männliche und weibliche Sprecher berechnen. [12] [13] Eine tabellarische Übersicht der vier vorgestellten Systeme befindet sich in Anhang A.

Bedrock SM50 STIPA-meter von Embedded Acoustics

Die Firma Embedded Acoustics bietet ebenfalls ein STIPA-Handmessgerät an. Dieses Messgerät soll sich vor allem für Laien eignen. Daher sind keine Kalibrierungen notwendig. Es ist einfach zu benutzen und bietet eine intuitive Oberfläche. Aber auch für erfahrene Nutzer des STI finden sich alle Einstellungen für komplexe Messungen. Es misst sowohl den häufig angewendeten STIPA als auch den vollen STI. Auf seinem farbigen Touch-Display lassen sich viele Werte der Messung anzeigen, darunter die folgenden: Die Nachhallzeit RT60, Echtzeit Oktav- und Terzbandanalysen und der äquivalente Dauerschallpegel. [14]

Der Vorteil gegenüber anderen Messsystemen liegt bei diesem Modell in seiner Einfachheit, sowie der Handlichkeit. Es reichen wenige Schritte, um sich den STI nach DIN EN 60268-16:2011 anzeigen zu lassen. Dabei ist es auch eine günstige Alternative.

Zusammenfassung der vier Messsysteme

Dies sind nur vier der momentanen Messsysteme die zum Zeitpunkt dieser BA verfügbar sind. Alle zeigen, dass es unterschiedliche Herangehensweisen sowie Nutzungsmöglichkeiten gibt. Sowohl als kostengünstigere App-Variante als auch als komplexe Software mit extra Soundboxen. Dies zeigt, dass eine große Nachfrage an einfach zu bedienenden Messgeräten für die Sprachverständlichkeit besteht. Des Weiteren basieren alle vier Messsysteme auf der DIN EN 60268-16 und arbeiten hauptsächlich mit dem direkten STIPA. Vor allem der XL2 Analysator beschränkt sich auf diese Art von Messung, da sie speziell auf Audioausgabeanlagen abgestimmt ist. Die indirekte Messmethode wird von keinem der drei Systeme genutzt. Der STIPA wird verwendet, da er die kürzesten Messzeiten hat, aber dennoch eine hohe Genauigkeit aufweist. Aufgrund dieser Erkenntnisse wird auch im Programm SAMURAI großen Wert auf den direkten STIPA gelegt.

1.6 Der Software-Entwicklungsprozess

Für die Entwicklung einer Software sind verschiedene Schritte nötig. Zu Beginn der Entwicklung muss festgelegt werden, welche Anforderungen an das Programm gestellt werden und wie der Endbenutzer das Programm nutzen soll. Dafür wird ein Lastenheft erstellt, in welchem diese Punkte festgehalten werden (siehe 2.). Der nächste Schritt ist der Entwurf der Software. Dafür werden die im Lastenheft beschriebenen Anforderungen umgesetzt. In Fall dieser Bachelorarbeit wurde zuerst ein Programm-Ablauf-Plan erstellt in dem die einzelnen Schritte und Funktionen der Software beschrieben werden (siehe 3.). Der Programmablaufplan befindet sich in Anhang D. Ist der Entwurf fertig, wird die Software programmiert und ins bestehende Programm implementiert (siehe 4.). Nachdem die Software nutzbar ist, wird sie auf ihre Funktion getestet. Dazu werden Messungen durchgeführt, welche mit bestehenden Messsystemen oder bereits gemessenen Werten validiert werden (siehe 5.). Sind all diese Schritte abgeschlossen ist auch der Software-Entwicklungsprozess vorerst abgeschlossen. Durch den Einsatz und die Wartung der Software können immer wieder bestehende Fehler bemerkt und verbessert werden. Somit gibt es kein Ende der Softwareentwicklung.

1.7 Grundlagen eines Lastenheftes

Laut der DIN Norm DIN 69901-5 wird ein Lastenheft beschrieben als: „Vom Auftraggeber festgelegte Gesamtheit der Forderungen an die Lieferungen und Leistungen eines Auftragnehmers innerhalb eines Projektauftrags.“ [15]

In dem speziellen Fall dieser Bachelorarbeit werden im Lastenheft die Grundlagen die das Programm enthalten muss, festgelegt. Es wird beschrieben, welche Funktionen die spätere Software haben muss und in welcher Form diese umgesetzt werden.

2. Schreiben eines Lastenheftes

Die neu gestaltete Messwertverarbeitungssoftware soll zur Ermittlung raumakustischer Eigenschaften, speziell Sprachverständlichkeitsindex STI, STIPA, Deutlichkeit (C50) und Klarheit (C80), dienen. Der Umfang besteht aus dem Entwurf, der Implementierung sowie dem Testen der neuen Software. Die Implementierung erfolgt mittels der grafischen Programmiersprache LabView. Der Inhalt der Arbeit soll folgende Schwerpunkte behandeln und ist deckungsgleich mit der Aufgabenstellung:

Stand der Technik

Es ist ein Abriss über den Stand der Wissenschaft und Technik zur Messung der Sprachverständlichkeit anzufertigen. Dazu soll beschrieben werden, in welchem Maße sich die DIN EN 60268-16 über die Jahre verändert hat. Darüber hinaus soll eine Übersicht zu marktüblichen Messgeräten erarbeitet werden, die alle relevanten Informationen zur Messung der Sprachverständlichkeit enthält. Unter diesen Geräten sollte sich auch das Messgerät befinden, welches später zur Validierung der Messergebnisse verwendet wird.

Inhalt der Software

Die Software soll dazu dienen, den raumakustischen Parameter STI zu messen. Dazu wird die Software mittels LabView realisiert. Um die Daten für die Berechnung des STI zu ermitteln wird SAMURAI genutzt. Es ist verlangt, den vollständigen STI sowie den STIPA zu messen. Sobald das Programm gestartet wird, verbindet es sich über TCP mit SAMURAI. Zu diesem Zeitpunkt wird die Entscheidung getroffen, ob man den vollständigen STI oder den (kürzeren) STIPA verwenden möchte. Die grundlegenden Einstellungen sollen jedoch so knapp wie möglich bemessen sein, um eine einfache Bedienung der Messsoftware zu ermöglichen. Danach soll die experimentelle STI-Software automatisch die entsprechenden Setups in SAMURAI laden. Die Setups sollten folgenden Daten anzeigen: das gemessene Signal in Pascal (Pa), ein Oktavbandspektrum sowie einen Pegelmesser, welchen den äquivalenten Dauerschallpegel in dB anzeigt. Die Einspeisung des Prüfsignals erfolgt über eine .wav-Datei, welche im jeweiligen SAMURAI Setup hinterlegt ist. Das Prüfsignal wird selbstständig über LabView erzeugt und als .wav-Datei ausgegeben. Nachdem eine Messung erfolgt ist, werden die gemessenen Daten (Signal und äquivalenter Dauerschallpegel) an die STI Software gegeben. Diese nutzt die Berechnungsgrundlage aus DIN EN 60268-16:2011 für den STI Wert. Alle dafür notwendigen Formeln befinden sich in Anhang C dieser Arbeit. Ausgegeben wird von der Software der STI sowie die MTF-Matrix. Die Implementierung erfolgt auf Grundlage

dieses Lastenheftes. Alle vorher beschriebenen Inhalte sollen sich in der endgültigen Software wiederfinden.

Validierung der Messergebnisse

Nachdem die Implementierung abgeschlossen wurde, soll die Software durch praxisnahe Messungen getestet werden. Die Ergebnisse dieser Messungen sollen mit mindestens einem auf dem Markt erhältlichen Messgerät, verglichen und bewertet werden. Dazu sollen mehrere Messreihen durchgeführt werden.

Verfassen eines Benutzerhandbuches

Ein Benutzerhandbuch wird verfasst, nachdem die Software getestet und eventuell verbessert wurde. In diesem soll auf einfache Art und Weise der Umgang beschrieben werden.

3. Entwurf der Software auf Grundlage der DIN EN 60268-16:2011

3.1 Aufbau der experimentellen Software

Der Schwerpunkt liegt auf dem reinen, direkten STI sowie dem direkten STIPA. Mittels LabView werden die Prüfsignale erzeugt, welche dann als .wav-Datei gespeichert werden. Diese .wav-Dateien werden dann über SAMURAI abgespielt. Die Verbindung von SAMURAI und LabView läuft über das Netzwerkprotokoll (TCP).

Für die STI Messung wurden nicht 98 Signale vorbereitet. Das Messsystem Bedrock SM50 nutzt ein Signal in welchem alle Modulationsfrequenzen vorkommen. Dieses Signal besitzt sieben Abschnitte in denen jeweils 14 der 98 Modulationsfrequenzen wiedergegeben werden. Aus diesem Grund wurde für die experimentelle Software eine ähnliche Vorgehensweise genutzt. Es werden sieben verschiedene STIPA ähnliche Messungen durchgeführt, in denen alle sieben Oktavbänder mit allen vierzehn Modulationsfrequenzen vorhanden sind. Somit ist eine volle STI Messung lediglich die Summe von sieben unterschiedlichen STIPA Messungen. Dadurch wird die Messzeit von 15 Minuten auf 65 Sekunden gekürzt.

Aus der Aufgabenstellung geht hervor, dass die experimentelle Software auch das Klarheitsmaß und das Deutlichkeitsmaß angeben soll. Da jedoch hauptsächlich auf die direkte Methode (siehe Punkt 1.4.4) der STI Messung gesetzt wird und die Impulsantwort nicht gemessen wird, ist es nicht möglich diese Funktion zu implementieren.

SAMURAI Setup

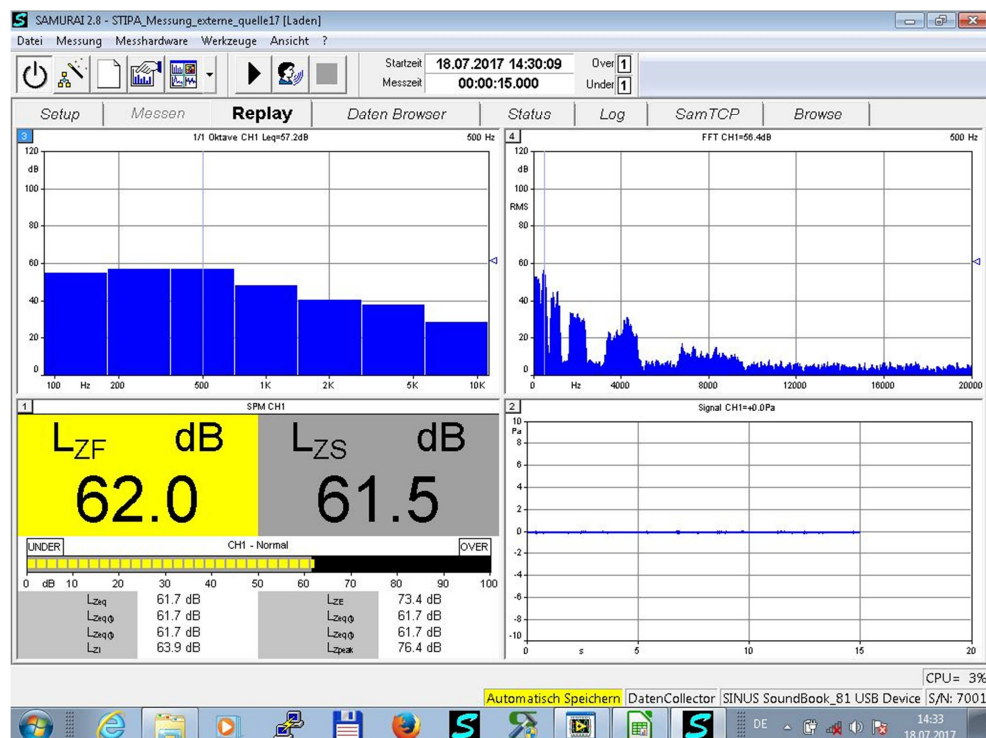
Um sowohl den vollständigen, direkten STI und den direkten STIPA messen zu können müssen insgesamt neun Setups erstellt werden. Sieben dieser Setups werden gebraucht um den vollständigen STI Messen zu können. Dafür mussten sieben Signale erstellt werden. Diese werden beim Ausführen des jeweiligen Setups wieder gegeben. Die beiden anderen Setups dienen zum Messen des STIPA-Prüfsignals. Es wurde ein Setup erstellt welches das Prüfsignal ausgibt und auch aufnimmt. Das andere STIPA-Setup wird genutzt, falls das Signal über eine externe Quelle abgespielt werden soll. Über einen Trigger, welcher ausgelöst wird sobald der Pegel auf über 60dB steigt, startet die Messung. Diese Setups werden später von LabView gesteuert, aktiviert und

ausgeführt. Für die Ausgabe des Prüfsignals werden .wav-Dateien genutzt. Für die Messung werden vier Graphen in SAMURAI eingerichtet:

- Ein Oktavpegelspektrum, welches dazu dient, zu erkennen ob das Prüfsignal im richtigen Frequenzbereich liegt. Dazu wird das Oktavspektrum in einem Bereich von 1Hz-12000Hz angezeigt.
- Ein FFT-Spektrum um die genaue Verteilung der Frequenzen bewerten zu können
- Ein Pegelmesser, welcher vor allem dazu dient, den äquivalenten Dauerschallpegel des Prüfsignals und den Schallpegel des Hintergrundgeräusches zu erfassen. Die zur Auswertung genutzten Pegel sind L_{Zeq} .
- Das gemessene Signal, diese Messwerte sind die Grundlage für die Berechnung des STI.

Das Folgende Bild Zeigt die Messoberfläche von SAMURAI, während einer STI-Messung:

Abbildung 4: Screenshot der SAMURAI Messung



3.2 Experimentelle Benutzeroberfläche

Die Bedienung der Software soll so einfach wie möglich sein. Um dies zu realisieren werden nur wenige Einstellungsoptionen zur Verfügung stehen.

Sobald das Programm gestartet wird, stellt es eine Verbindung zu SAMURAI her. Ist diese Verbindung hergestellt, wird die Auswahl geboten, ob man das reine, direkte STI Prüfverfahren oder das einfachere STIPA-Verfahren verwenden will. Sobald die Entscheidung getroffen wurde werden in SAMURAI die die Setups für die Messung geladen und durchgeführt. Währenddessen kann man die Messung in LabView verfolgen. Zu sehen ist ein Oktavbandspektrum sowie ein Pegelmesser. Sind alle Messungen beendet, wird der STI-Wert ausgegeben. Dieser wird Anhand einer Skala bewertet. Sobald die Messung beendet ist, besteht die Entscheidungsmöglichkeit eine neue Messung zu beginnen oder das Programm zu beenden. Für einen Programmablaufplan, siehe Anhang D.

4. Implementierung des Entwurfs

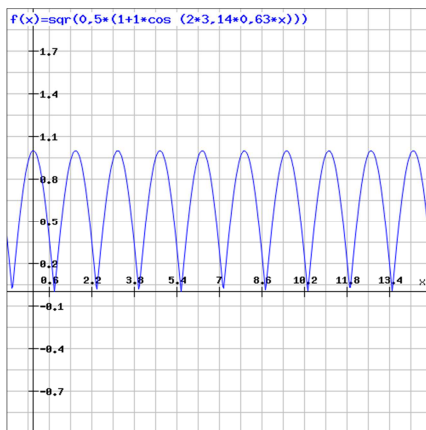
Mittels LabView wurden vier Programme geschrieben. Dies waren: die Prüfsignalerzeugung, die Verbindung zu SAMURAI mittels TCP, die Auswertung des gemessenen Signals und die Berechnung des STI.

4.1 Erzeugen des Prüfsignals

Für die Erzeugung des Prüfsignals wird als Grundlage ein weißes Rauschen genutzt. Die DIN Norm schreibt jedoch explizit ein rosa Rauschen vor.[6] Daher wurde das weiße Rauschsignal gefiltert. Um das Grundsignal für die Messungen zu erzeugen, müssen über das so entstandene rosa Rauschen Oktavbandfilter gelegt werden. Diese Filter haben jeweils die Breite einer halben Oktave und die Mittenfrequenzen von 125Hz bis 8000Hz.

Jedes so erzeugte Geräusch wird nun amplitudenmoduliert. Dazu wird Formel 1.8 genutzt. Diese ist in Punkt 1.4.6 genauer beschrieben. Die folgende Grafik zeigt diese Funktion am Beispiel für eine Modulationsfrequenz von 0,63Hz:

Abbildung 5: : Funktion für die Amplitudenmodulation mit Modulationsfrequenz



Mit dieser Methode wurden 98 Einzelsignale erzeugt. Für das Prüfsignal des STIPA, werden mehrere Signale zeitgleich abgespielt. Pro Oktavband werden zwei Modulationsfrequenzen genutzt. Aus diesem Grund muss hier die Modulationstiefe jedes Signals 0,55 sein. [6]

Das in LabView genutzte Blockdiagramm für die Erzeugung des Prüfsignals, befindet sich in Anhang E.

4.2 Verbindung von LabView und SAMURAI mittels TCP

Um LabView mit SAMURAI zu verbinden wird das so genannte Transmission Control Protocol (TCP) genutzt. Die Grundlage bildet hierbei ein Zustandsautomat oder auch einen endlichen Automaten. Dies bedeutet das, dass Programm zu jeder Zeit einen Zustand besitzt. Ein Automat ist endlich wenn die Anzahl seiner Zustände, die er Annehmen kann, endlich ist. Diese Zustände werden durch Eingaben, Ereignisse und den jeweiligen Status von SAMURAI gewechselt. Für die Messung des STI werden zehn Zustände genutzt. Teilweise entsprechen die Namen der Zustände auch den Befehlen, welche von LabView an SAMURAI übertragen werden. Lediglich der Leerlauf ist kein Befehl. Die Zustände sind:

- **Leerlauf (0)**
Hierbei wartet Labview auf eine Eingabe. Dieser Zustand folgt hauptsächlich nach einer abgeschlossenen Messung.
- **Connect (1)**
In diesem Zustand verbindet sich LabView mit SAMURAI.
- **Harmonieconnect (2)**
LabView verbindet sich mit der Hardware, die SAMURAI nutzt.
- **Disconnect (3)**
Die Verbindung zu SAMURAI wird gelöst.
- **Status (4)**
Fragt den momentanen Status von SAMURAI ab.
- **New (5)**
Ein neues Setup wird in SAMURAI geladen.
- **Run (6)**
Eine Messung mit dem Momentan geladenen Setup wird gestartet..
- **Currentdata (7)**
Verschiedene von ausgewählte Daten von SAMURAI können zu LabView übertragen werden.
- **Repeat Currentdata (8)**
Daten mit Einstellungen aus Currentdata werden an LabView weitergegeben.
- **Recall (9)**
Ruft eine Abgeschlossene Messung im "Browse" Fenster von SAMURAI auf.
- **Wavedata (10)**
Überträgt die Zeitdaten des Signals mittels binären Format über TCP.

- **Loadsetup (11)**

Lädt ein ausgewähltes Setup für SAMURAI.

Der Ablauf der einzelnen Zustände stellt sich wie folgt dar: Sobald das Programm gestartet wird, ist Zustand 1 (Connect). LabView verbindet sich also über TCP mit SAMURAI. Ist dieser Vorgang abgeschlossen, geht das Programm in Zustand 2 (Harmonieconnect) über. Hierbei wird eine Verbindung zur Hardware für die Messung aufgebaut. Nachdem dies vorbereitet ist, geht LabView in den Zustand 11 (Loadsetup) über. Ein neues Setup wird geladen. Ist dieses Setup geladen, folgt Zustand 5 (New). Während dieses Zustandes wird die neue Messung in SAMURAI vorbereitet. Sobald die Messung vorbereitet ist, startet der 6 (Run). Zustand. Dieser startet die Messung. Sobald die Messung abgeschlossen ist, geht das Programm in Zustand 7 (Currentdata) und direkt danach in Zustand 8 (Repeatcurrentdata) über. Jetzt werden die gemessenen Pegel der Oktavbänder an die Software übermittelt. Sind die Daten übermittelt, wird durch Zustand 9 die eben durchgeführte Messung geladen. Jetzt kann über Wavedata (Zustand 10, Wavedata) das Zeitsignal übertragen werden. Dies geschieht mittels binärer Daten und muss noch übersetzt werden. Nachdem alle Daten übermittelt wurden, startet der Leerlauf (Zustand 0, Leerlauf). Hier kann entschieden werden, ob die Messungen beendet werden sollen (Zustand 3, Disconnect) oder ob eine weitere Messung durchgeführt werden soll (Zustand 5, New).

Für den STIPA muss lediglich ein Setup geladen werden. Die Messung des STI braucht jedoch sieben Setups, daher wird hier das erste Setup geladen, die Messung durchgeführt und das Signal ausgewertet. Alle MTF-Werte dieser sieben Messungen werden dann zu einer einzigen MTF-Matrix zusammengefügt und berechnet.

Das genutzte Blockdiagramm aus Labview für die TCP Verbindung befindet sich in Anhang F.

4.3 Auswertung des gemessenen Signals

Um das gemessene Signal auszuwerten wird die in der DIN Norm beschriebene Vorgehensweise genutzt. Das Signal wird zuerst in Oktavbandsignale gefiltert. Diese Filter sind ein Oktavband breit und besitzen die Mittenfrequenzen 125Hz bis 8000Hz. Um ein Intensitätszeitsignal zu erhalten, werden die Ausgänge der Filter quadriert. Die Intensitätshüllkurve entsteht nun durch die Anwendung eines Tiefpassfilters bei einer Grenzfrequenz von 100Hz. Mittels dieser Hüllkurve wird nun die MTF Matrix erstellt,

welche als Grundlage der STI-Berechnung dient. Dazu wird folgende Formel angewendet:

$$mdr_{k,f_m} = 2 \cdot \frac{\sqrt{\sum [I_k(t) + \sin(2\pi f_m t)]^2 + \sum [I_k(t) + \cos(2\pi f_m t)]^2}}{\sum I_k(t)} \quad (4.1)$$

Dabei ist:

f_m ... die Modulationsfrequenz in Hz;

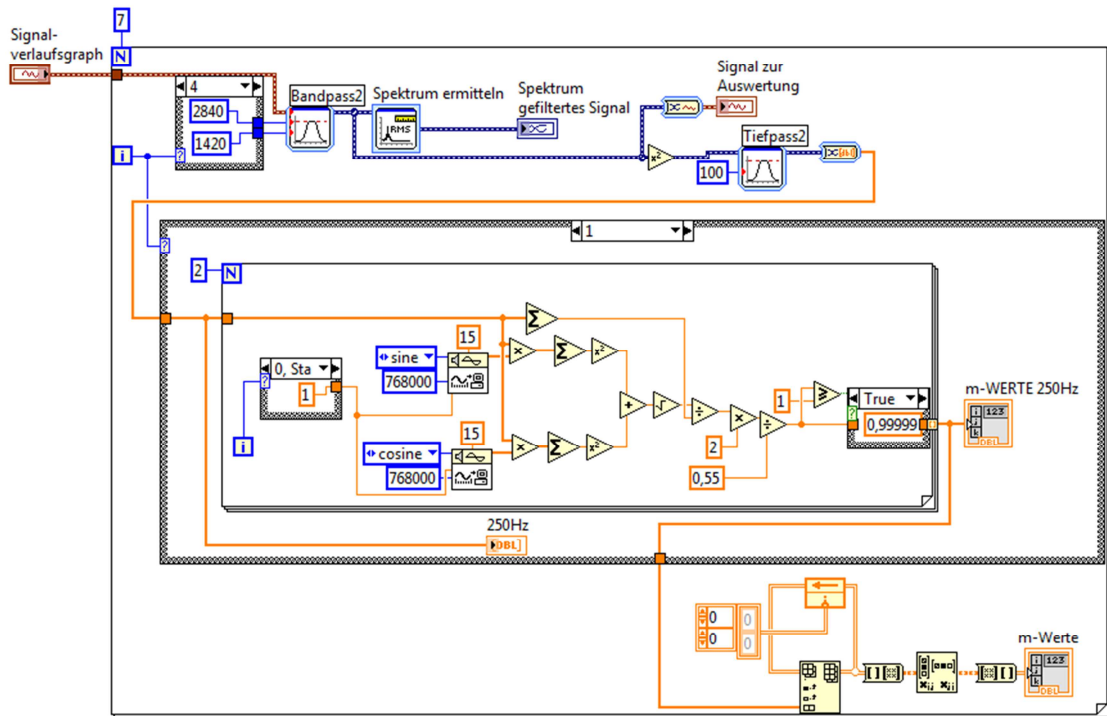
t ... die Zeit in s;

$I_k(t)$... die Intensitätshüllkurve als Funktion der Zeit für Oktavband k .

Das folgende Bild (Abbildung 6) zeigt das Blockdiagramm der Auswertung für eine STIPA Messung. Nachdem das Signal gemessen ist, wird es in sieben Schleifen in die Oktavbänder gefiltert. Der Filter ist ein Butterworthfilter der 10. Ordnung. Jedes dieser gefilterten Signale wird quadriert und durchläuft dann einen Tiefpass mit der Grenzfrequenz von 100Hz. Durch diesen Vorgang entstehen die Intensitätshüllkurven. [6] Durch die Anzahl der Schleifen wird ein Case-Sektor ausgewählt. Dieser Sektor berechnet anhand des gefilterten Oktavbandes die STI-Werte für die jeweiligen zwei Modulationsfrequenzen (siehe dazu Kapitel 1.4.3). Nachdem für alle Bänder die Werte ermittelt wurden, werden sie als MTF-Matrix ausgegeben. Da Werte über 1 nicht für die Berechnung verwendet werden können, wird jeder Wert auf 0,99999 begrenzt. Durch die Korrekturfaktoren kann es während der Berechnung dazu kommen, dass Werte, die gleich 1 sind, zu Werten über 1 werden. Da diese allerdings im späteren Verlauf der Berechnung nicht mehr genutzt werden können, wurde die Begrenzung auf einen Wert nahe 1 festgelegt.

Da für die vollständige STI Messung ein Prüfsignal verwendet wird, welches in sieben Abschnitten alle Modulationsfrequenzen besitzt, wird für die Auswertung das gleiche Programm genutzt, wie für die Auswertung des STIPA. Jedoch unterscheiden sich die Modulationsfrequenzen, welche für die Auswertung verwendet werden. Die Modulationsfrequenzen der sieben STIPA-ähnlichen Auswertungsprogramme sind in Anhang H zu finden.

Abbildung 6: Blockdiagramm der STIPA Prüfsignal Auswertung



4.4 Berechnung des STI mittels LabView

Für die Programmierung der Berechnung wurden die Schritte durchgeführt welche in Anhang C beschrieben werden. So werden zuerst die Signal-Rauschabstände jeder Oktave gemessen. Daraus wird der Modulationsübertragungswert nur für das Geräusch bestimmt. Der reziproke Wert dieser Werte bildet die Anpassung zur Entfernung des Hintergrundgeräusches. Im nächsten Schritt werden die Korrekturfaktoren für Schwellenfaktoren und Verdeckung berechnet. Dies sind $l_{k,i}$, $l_{r,i,k}$ und $l_{am,i,k}$. Mit diesen Faktoren wird die Anpassung an Verdeckung und Schwelle berechnet. Aus den Reziproken der Anpassung bildet sich die Anpassung der Entfernung von Verdeckung und Schwelle. Die beiden Anpassungswerte werden für jede Oktave multipliziert. Somit errechnet sich die kombinierte Anpassung. Über eine Multiplikation der MTF-Matrix mit dieser kombinierten Anpassung entsteht eine neue MTF-Matrix ohne Geräusch, Verdeckung und Schwelle. Diese Berechnung wiederholt sich nun, um die Matrix an den Betriebspegel anzupassen. Dazu werden die Modulationsübertragung des operativen Signalpegels zum operativen Hintergrundpegel mit der Anpassung der Schwellenfaktoren und der Verdeckung multipliziert. Durch eine Multiplikation mit der MTF Matrix entsteht die Matrix für Betriebspegel, Verdeckung und Schwelle. Der nächste Schritt ist die Berechnung der Signal-Noise-Ratio sowie die Begrenzung dieser Werte. Mittels einer Formel werden

die effektiven SNR-Werte errechnet und dann auf einen Bereich von $-15 \text{ dB} < \text{SNR}_{\text{eff}} < 15 \text{ dB}$ begrenzt. Die Werte dieser Matrix werden in einen $\text{TI}_{k;\text{fm}}$ umgerechnet und dann mittels Oktavbandbewertungsfaktoren in einen MTI mit Bewertungsfaktoren (MTI_{α}) und einen MTI mit Redundanzfaktoren (MTI_{β}) umgerechnet. Die Subtraktion des MTI_{β} von MTI_{α} ergibt den endgültigen STI.

Da das Blockdiagramm der Berechnung zu umfangreich ist, wird in dieser Arbeit auf eine Abbildung verzichtet. Alle Rechenschritte befinden sich in Anhang C.

5. Testen der experimentellen Software

5.1 Messaufbau

Grundlegendes

Um die Messsoftware ausführlich zu testen, wird eine Reihe von Testmessungen durchgeführt. Diese Messungen fanden am Dienstag den 18.07.2017 im Gebäude der SINUS Messtechnik GmbH und am 19.07.2017 im Hörsaal N001 der HTWK Leipzig statt. Als Testraum in der SINUES Messtechnik GmbH wurde der Konferenzraum im Erdgeschoss des Gebäudes verwendet. Das Equipment setzt sich aus folgenden Teilen zusammen: Soundbook Mk2, ein ICP Mikrofon der Klasse 2, einem Monitor MO-1 der Firma musicelectronic geithain, einem Bedrock SM50 STI Messgerät und einer BTB65 TalkBox der Firma embedded Acoustics. Gemessen werden sollten der vollständige, direkte STI sowie der kürzere, direkte STIPA. Das Hauptaugenmerk liegt hierbei auf dem STIPA. Dieser ist die in der Praxis meist angewandte Messmethode.

In beiden Räumen wurden drei Mikrofonpositionen festgelegt, welche den Positionen von Hörern entsprechen würden. An jeder Position wurden beide Mikrofone in einem Abstand Kapsel zu Kapsel von 4 cm aufgestellt. An allen Positionen wurden drei Messungen durchgeführt, um durch eine Mittelung genauere Ergebnisse zu bekommen. Zwei Positionen für die Boxen wurde festgelegt, um den Unterschied des STI von verschiedenen Sprecherpositionen zu testen. Bilder und eine Skizze zum Messaufbau befinden sich in Anhang G.

konkreter Messaufbau

Für die Messungen in der SINUS Messtechnik GmbH wurden insgesamt vier Messreihen durchgeführt. Für die erste Messreihe wurde der Monitor an Boxposition Eins aufgestellt. Der Lautsprecher befand sich in einer Höhe von 176 cm. Die Mikrofone wurden nacheinander an Messposition Eins, Zwei und Drei aufgebaut. Zur Messung wurde in der Software eingestellt, dass STIPA gemessen werden soll. Das Testsignal soll direkt von SAMURAI ausgegeben werden sowie keine operativen Pegel sollen genutzt werden. Für die Messung mit dem Bedrock SM50 wurde die Einstellung STIPA PRO verwendet. Eine Messung dauerte 15 Sekunden.

Die zweite Messreihe wurde ähnlich der ersten durchgeführt. Jedoch befand sich an Boxposition Eins die TalkBox. Vor jeder Messung wurde ein STIPA Testsignal von der TalkBox gestartet. Die Einstellungen in der Messsoftware waren: STIPA Messung,

externes Prüfsignal und Berechnung ohne operative Pegel. Die Messmikrofone wurden wieder an den drei Positionen platziert. Eine Messung dauerte 15 Sekunden.

Für die dritte Messreihe wurde die Boxposition verändert. Die TalkBox wurde an Boxposition zwei aufgestellt. Die Messmikrofone wurden lediglich an Messposition Eins platziert um diese Messungen mit den Ergebnissen aus Messreihe Eins zu vergleichen. Hierbei wurden die Einstellungen in der Messsoftware, wie in Messreihe zwei verwendet. Die vierte Messreihe sollte zur Messung des vollständigen direkten STI genutzt werden.

Die vierte Messreihe war die STI Messreihe. Hierzu wurde lediglich an einer Position die Funktion dieser Option getestet, da es sich lediglich um sieben STIPA-ähnliche Messungen handelt. Weiterhin ist der STIPA durch seine wesentlich längere Messzeit weniger praxisrelevant.

Im Hörsaal der HTWK Leipzig wurden nur drei Messreihen durchgeführt. Hierbei wurde nur der STIPA gemessen. Während der ersten Messreihe wurde die Beschallungsanlage des Saals genutzt um die Prüfsignale auszugeben. Dies entspricht einer elektrischen Ausgabe und einer akustischen Einspielung (siehe dazu Punkt 1.4.3). Die Einstellung war, STIPA Messung, Prüfsignalauspielung durch SAMURAI und Berechnung ohne operative Pegel.

Die zweite Messreihe, wurde gleich der ersten durchgeführt. Jedoch wurde diesmal zum Ausspielen des Prüfsignals die embedded TalkBox genutzt. Diese wurde an das Pult in einer Höhe von ca. 176 cm gestellt.

Für die dritte Messreihe wurde der Geithain Monitor genutzt. Da sich während der Messungen in der SINUS Messtechnik GmbH herausgestellt hatte, dass durch diesen Monitor wesentlich schlechtere Werte erzielt werden, wurde lediglich eine Messposition gemessen. Dies war Messposition Eins.

5.2 Messergebnisse

Vor Beginn der Messungen wurden Hintergrundgeräuschpegelmessungen durchgeführt. Für alle berechneten Werte wurden diese Pegel genutzt. Alle Mikrofone wurden vor der Messung kalibriert auf 94dB.

Tabelle 6: gemessener Störgeräuschpegel während der Messungen bei SINUS Messtechnik

Oktavband in Hz	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Leq in dB	29,9	26,0	20,9	19,4	20,2	22,4	24,9

Tabelle 7: gemessener Störgeräuschpegel während der Messungen im Hörsaal N001 der HTWK Leipzig

Oktavband in Hz	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Leq in dB	37,2	35,7	31,2	28,8	25,8	24,5	25,3

Vor den nun folgenden Messungen wurden bereits einige Testversuche durchgeführt, um eventuelle Fehler der Software verbessern zu können.

5.2.1 Messungen bei SINUS Messtechnik GmbH

Messreihe Eins

Tabelle 8: Messwerte im Vergleich aus Messreihe Eins

STIPA – Geithain Monitor	Messposition 1		
	experimentelle Software	Bedrock SM50	Differenz
Messung 1	0,85	0,81	0,04
Messung 2	0,85	0,82	0,03
Messung 3	0,85	0,81	0,04
Mittelwerte der Messungen	0,85	0,81	0,04
	Messposition 2		
	experimentelle Software	Bedrock SM50	Differenz
Messung 1	0,69	0,65	0,04
Messung 2	0,69	0,66	0,03
Messung 3	0,69	0,66	0,03
Mittelwerte der Messungen	0,69	0,66	0,03
	Messposition 3		
	experimentelle Software	Bedrock SM50	Differenz
Messung 1	0,71	0,65	0,06
Messung 2	0,70	0,66	0,04
Messung 3	0,71	0,63	0,08
Mittelwerte der Messungen	0,71	0,65	0,06

Messreihe Zwei*Tabelle 9: Messwerte im Vergleich aus Messreihe Zwei*

STIPA – embedded TalkBox	Messposition 1		
	experimentelle Software	Bedrock SM50	Differenz
Messung 1	0,82	0,81	0,01
Messung 2	0,82	0,81	0,01
Messung 3	0,85	0,81	0,04
Mittelwerte der Messungen	0,83	0,81	0,02
	Messposition 2		
	experimentelle Software	Bedrock SM50	Differenz
Messung 1	0,72	0,71	0,01
Messung 2	0,74	0,72	0,02
Messung 3	0,75	0,71	0,04
Mittelwerte der Messungen	0,74	0,71	0,02
	Messposition 3		
	experimentelle Software	Bedrock SM50	Differenz
Messung 1	0,74	0,71	0,03
Messung 2	0,74	0,71	0,03
Messung 3	0,71	0,73	0,02
Mittelwerte der Messungen	0,73	0,72	0,03

Messreihe Drei*Tabelle 10: Messwerte im Vergleich aus Messreihe Drei*

STIPA – unterschiedliche Boxposition	Boxposition 1		
	experimentelle Software	Bedrock SM50	Differenz
Messung 1	0,85	0,81	0,04
Messung 2	0,85	0,82	0,03
Messung 3	0,85	0,81	0,04
Mittelwerte der Messungen	0,85	0,81	0,04
	Boxposition 2		
	experimentelle Software	Bedrock SM50	Differenz
Messung 1	0,68	0,66	0,02
Messung 2	0,68	0,67	0,01
Messung 3	0,69	0,66	0,03
Mittelwerte der Messungen	0,68	0,66	0,02

Messreihe Vier*Tabelle 11: Messwerte im Vergleich aus Messreihe Vier*

STI – Geithain Monitor	Messposition 1		
	experimentelle Software	Bedrock SM50	Differenz
Messung 1	0,84	0,82	0,02
Messung 2	0,82	0,80	0,02
Messung 3	0,87	0,82	0,05
Mittelwerte der Messungen	0,84	0,81	0,03

5.2.2 Messungen im Hörsaal N001 der HTWK Leipzig

Messreihe Eins

Tabelle 12: Messergebnisse aus HTWK-Messung Eins

STIPA – Beschallungs- anlage	Messposition 1		
	experimentelle Software	Bedrock SM50	Differenz
Messung 1	0,61	0,55	0,06
Messung 2	0,62	0,55	0,07
Messung 3	0,62	0,56	0,06
Mittelwerte der Messungen	0,62	0,55	0,07
	Messposition 2		
	experimentelle Software	Bedrock SM50	Differenz
Messung 1	0,61	0,58	0,03
Messung 2	0,60	0,58	0,02
Messung 3	0,60	0,59	0,01
Mittelwerte der Messungen	0,60	0,58	0,02
	Messposition 3		
	experimentelle Software	Bedrock SM50	Differenz
Messung 1	0,58	0,54	0,04
Messung 2	0,56	0,55	0,01
Messung 3	0,61	0,60	0,01
Mittelwerte der Messungen	0,58	0,57	0,01

Messreihe Zwei*Tabelle 13: Messergebnisse aus HTWK-Messung Zwei*

STIPA – embedded TalkBox	Messposition 1		
	experimentelle Software	Bedrock SM50	Differenz
Messung 1	0,59	0,60	0,01
Messung 2	0,60	0,60	0,00
Messung 3	0,61	0,59	0,02
Mittelwerte der Messungen	0,60	0,60	0,00
	Messposition 2		
	experimentelle Software	Bedrock SM50	Differenz
Messung 1	0,57	0,58	0,01
Messung 2	0,56	0,57	0,01
Messung 3	0,58	0,58	0,00
Mittelwerte der Messungen	0,57	0,58	0,01
	Messposition 3		
	experimentelle Software	Bedrock SM50	Differenz
Messung 1	0,58	0,54	0,04
Messung 2	0,56	0,55	0,01
Messung 3	0,61	0,60	0,01
Mittelwerte der Messungen	0,58	0,56	0,02

Messreihe Drei*Tabelle 14: Messergebnisse aus HTWK-Messung Drei*

STIPA – Geithain Monitor	Messposition 1		
	experimentelle Software	Bedrock SM50	Differenz
Messung 1	0,62	0,58	0,04
Messung 2	0,62	0,57	0,05
Messung 3	0,62	0,55	0,07
Mittelwerte der Messungen	0,62	0,57	0,05

5.3 Auswertung der Messungen

Die Ergebnisse der Messungen zeigen, wie sich die Messwerte verändert haben, wenn sich die Messmikrofone pro Messung von dem Monitor entfernt haben. Wie zu erwarten nimmt die Sprachverständlichkeit mit Zunahme der Entfernung ab. Lediglich während der Messungen mit dem Geithain Monitor im Raum der Sinus Messtechnik GmbH sind die STI-Werte der Messposition Zwei schlechter als die der Messposition Drei. Im Vergleich zur embedded TalkBox hat der Geithain Monitor schlechter abgeschnitten. Die STI-Werte der TalkBox sind in fast allen Fällen besser. Dies rührt mit hoher Wahrscheinlichkeit daher, dass der Monitor nicht darauf ausgelegt ist, die Prüfsignale wiederzugeben. Die TalkBox hingegen wurde speziell für den Zweck der STI-Messung entwickelt.

Als die Boxposition geändert wurde, fielen die STI-Werte stark ab. Betrug dieser auf Boxposition Eins noch 0,85, sank er bei Boxposition Zwei auf 0,68. Dies ist ein Abfall von 0,17. Die Mikrofone waren dabei auf Boxposition Eins und der Monitor gerade in den Raum hinein ausgerichtet. Dies zeigt, dass der STI nicht aussagekräftig ist, wenn die Mikrofone nicht zur Box ausgerichtet sind.

Der STI besitzt dieselben Abweichungen wie der gemessene STIPA.

Im Vergleich der Beschallungsanlage zur TalkBox sind die Werte der Beschallungsanlage besser. Dies war anzunehmen, da die Beschallungsanlage den Zweck erfüllen soll, dass alle Studenten im Hörsaal den Dozenten verstehen können.

Wären die Werte der Talkbox besser gewesen, so wäre die Beschallungsanlage redundant. Allerdings konnte die Beschallungsanlage nicht auf 60dB in einem Meter Abstand eingestellt werden, da sie zu hoch hing. Daher könnten sich die besseren Werte ergeben. Der Geithain Monitor erbrachte beinahe dieselben Werte wie die Beschallungsanlage. Weil der Pegel des Monitors nicht exakt auf 60dB in einem Meter Entfernung eingestellt werden konnte, können sich die besseren Werte im Vergleich zur Talkbox ergeben.

Die Werte der Beschallungsanlage nehmen mit zunehmender Entfernung ab. Die gleichen Messungen mit der TalkBox zeigen jedoch bei Messposition Zwei und Drei fast die gleichen Werte. Der STI von Position Zwei ist sogar um 0,01 schlechter, als der STI-Wert von Position Drei. Es sollte jedoch genau anders herum sein. Für die Messungen der Beschallungsanlage hat der Schreiber dieser Bachelorarbeit angenommen, dass die Werte für alle Positionen beinahe gleich sind, da in der Mitte des Hörsaals Lautsprecher der Beschallungsanlage angebracht wurden.

5.4 Vergleich der Ergebnisse mit auf dem Markt erhältlichen Messgeräten

Um zu validieren, dass die Messwerte, die die experimentelle Software ausgibt korrekt sind, wurden alle Messungen auch mit dem Bedrock SM50 durchgeführt. Sollten die STI-Werte beider Messsysteme ungefähr gleich sein (die Norm schreibt maximal 0,03 Abweichung vor bei zwei separaten Messungen[6]), so kann davon ausgegangen werden, dass die experimentelle Software richtig funktioniert.

5.4.1 Messungen bei SINUS Messtechnik GmbH

Während dieser Messungen hat sich gezeigt, dass es Abweichungen von größer 0,03 vor allem bei den Messungen mit dem Geithain Monitor gibt. Die Unterschiede erstrecken sich von 0,04 – 0,06. Eine mögliche Erklärung ist, dass im Gegensatz zur embedded TalkBox ein anderes Signal verwendet wurde. Außerdem ist der Monitor nicht speziell für STI-Messungen gedacht.

Die Messungen mit der TalkBox haben gezeigt, dass die Werte in einem anzunehmenden Bereich liegen. Hier waren die Abweichungen lediglich zweimal größer als 0,03. Da sich diese Abweichungen jedoch weg mitteln, kommt es im

Endeffekt zu einem STI-Wert im erlaubten Bereich. Dies zeigt, dass die experimentelle Software zuverlässig funktioniert.

5.4.2 Messungen im Hörsaal N001 der HTWK Leipzig

Die Ergebnisse dieser Messungen sind besonders gut ausgefallen. Der mit der experimentellen Software gemessene STI-Wert der ersten Messposition ist der einzige, welcher sich stark von dem gemessenen Wert des Bedrock SM50 unterscheidet. Besonders die Messungen mit der TalkBox zeigen eine starke Übereinstimmung. Wie auch bei den Messungen im Raum der SINUS Messtechnik GmbH zeigen die Werte mit dem Geithain Monitor größere Unterschiede auf. Dies lässt den Schluss zu, dass zum Messen eine Talkbox gebraucht wird.

5.4.3 Detaillierter Vergleich einer Messung

In den vorherigen Punkten wurde lediglich auf die Unterschiede des STI-Wertes eingegangen. Da vor den eigentlichen Messungen Testmessungen durchgeführt wurden, um Fehler in der experimentellen Software festzustellen, gab es in diesen Testmessungen noch größere Abweichungen der experimentellen Software. Nur die Auswertung der endgültigen STI-Werte gab jedoch nicht genügend Aufschluss, warum diese Fehler zustande kommen. Deswegen wird im Folgenden eine Testmessung detaillierter analysiert. Dabei wird getestet, in wie weit sich die gemessene MTF Matrix unterscheidet und ob es Unterschiede in der Berechnung des schlussendlichen Wertes gibt. Dazu wurde eine Messung ausgewählt, welche vor den finalen Messungen stattgefunden hat.

Messung der Signalpegel*Tabelle 15: Unterschiede der gemessenen L_{eq} Pegel*

Oktavband in Hz	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Leq in dB, Bedrock SM50	51,7	56,8	53,3	44,4	38,6	30,7	25,2
Leq in dB, Experimentelle Software	50,1	56,4	52,8	43,6	37,9	31,3	27,6

Schon im Vergleich der gemessenen Schallpegel lassen sich Unterschiede erkennen. Alle Pegel weisen eine Differenz auf. Das Bedrock SM50 misst im Allgemeinen etwas höhere Pegel. Dadurch können bereits unterschiedliche STI-Werte entstehen, denn durch den Signal – Rauschabstand, wird die Korrektur des Hintergrundgeräusches durchgeführt (siehe dazu Anhang C, Punkt 2).

Werte der MTF-Matrix

Auch die MTF-Matrix weist gewisse Unterschiede auf. In den Oktavbändern von 125Hz bis 2000Hz sind diese Unterschiede jedoch sehr gering. Lediglich die beiden Bänder 4000Hz und 8000Hz weisen Abweichungen von 0,09 bis 0,20 auf. Jedoch erklärt diese Abweichung nicht, warum die Werte der experimentellen Software nach oben hin abweichen. Da die stark abweichenden Werte der MTF Matrix niedriger sind als die des Bedrock SM50, müssten auch die STI-Werte niedriger ausfallen. Die folgende Tabelle zeigt die Unterschiede der MTF-Matrix. Eine mögliche Erklärung warum es dennoch zu solchen Abweichungen des STI-Wertes kommen kann, ist die Berechnung. Falls die Software des Bedrock SM50 eine leicht andere Berechnung vornimmt, könnte es zu abweichenden Werten kommen.

Tabelle 16: Unterschiede der MTF-Matrix

Oktavband in Hz	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Modulationsfrequenz fm in Hz	1,60	1,00	0,63	2,00	1,25	0,80	2,5
Gemessenen							
Modulationstiefe - Bedrock SM50	0,36	0,68	1,02	0,92	0,92	0,86	0,59
Gemessenen							
Modulationstiefe – experimentelle Software	0,37	0,70	0,99	0,91	0,94	0,77	0,39
Modulationsfrequenz fm in Hz	8,00	5,0	3,15	10,0	6,25	4,00	12,50
Gemessenen							
Modulationstiefe - Bedrock SM50	0,14	0,34	0,86	0,46	0,68	0,78	0,31
Gemessenen							
Modulationstiefe – experimentelle Software	0,16	0,29	0,87	0,47	0,65	0,64	0,18

Berechnung der gemessenen Bedrock SM50 Werte durch die Software der experimentellen Software

Um herauszufinden ob die Berechnungen des Bedrock SM50 und der experimentellen Software gleich sind, werden die gemessenen Werte des Bedrock SM50 (MTF-Matrix und Signalpegel) in die Berechnung der experimentellen Software eingegeben. Sollten sich andere STI Werte ergeben, kann darauf geschlossen werden, dass die Berechnung anders verläuft. In diesem Falle lässt sich eine genauere Validierung der experimentellen Software nicht durchführen, da nicht zurückverfolgt werden kann, in wie weit sich die Berechnungen unterscheiden. Es konnte kein Einblick in die Berechnungsgrundlage der embedded Software genommen werden.

Die folgende Tabelle zeigt die Unterschiede der Berechnungen des Bedrock SM50 und der experimentellen Software. Wie zu erkennen ist, werden trotz gleicher Eingangswerte unterschiedliche MIT- und STI-Werte ausgegeben. Die MIT-Werte der Oktavbänder 250Hz bis 2000Hz haben beinahe dieselben Werte. Lediglich die Bänder 125Hz, 4000Hz und 8000Hz haben stark abweichende Werte. Durch diese Abweichung ergibt sich ein unterschiedlicher STI-Wert. Der berechnete Wert der

experimentellen Software ist mehr als 0,1 größer. Da die Berechnung des Bedrock SM50 nicht nachvollzogen werden kann, können über diesen Punkt hinaus keine Verbesserungen an der experimentellen Software vorgenommen werden.

Tabelle 17: Unterschiede der Berechnung des Bedrock SM50 und der experimentellen Software

Oktavband in Hz		125	250	500	1000	2000	4000	8000
MIT - Werte	experimentelle Software	0,378	0,507	0,882	0,672	0,767	0,986	0,792
	Bedrock SM50	0,28	0,51	0,88	0,67	0,73	0,72	0,46
STI - Werte	experimentelle Software	0,785						
	Bedrock SM50	0,68						

5.5 Ergebnisse der Messungen

Als Ergebnis beider Messreihen lassen sich einige Schlussfolgerungen ziehen. Die wichtigste davon ist, dass die experimentelle Messsoftware validierbare Werte liefert. Besonders gute Werte ließen sich mit der TalkBox erzielen. Da der Geithain Monitor schlechtere Ergebnisse lieferte, wird empfohlen, diesen nicht zu verwenden. Es wird vorgeschlagen, einen Lautsprecher mit den Eigenschaften einer Talkbox zu verwenden.

Die experimentelle Software gibt auch bei Messungen von Beschallungsanlagen, validierbare Werte aus. Somit kann sie sowohl für eine Messung mit akustischer Einspeisung und akustischer Ausspielung, wie auch für eine Messung mit elektrischer Einspeisung und akustischer Ausspielung genutzt werden.

6. Zusammenfassung

6.1 Verfassen eines Benutzerhandbuches

Um sicherzustellen, dass das Programm richtig genutzt wird, wird im Folgenden ein Benutzerhandbuch erstellt.

6.1.1 Installation der Software

Um die Software zu installieren, muss im Ordner „STI-Messung“ die Datei „Setup.exe“ ausgeführt werden. Daraufhin wird die Installation gestartet. Der Nutzer kann auswählen, an welchen Ort die Software installiert werden kann. Es werden nun alle benötigten Dateien installiert. Weiterhin wird die LabView Runtime Engine von National Instruments installiert, um das Programm ausführen zu können. Ist die Installation abgeschlossen, müssen die Prüfsignale in den Installationsordner kopiert werden, um eine Wiedergabe per SAMURAI zu gewährleisten. Alternativ kann im SAMURAI-Setup manuell eingestellt werden, von welchem Ort das Signal abgespielt werden soll. Weiterhin müssen die vorbereiteten Setups für die STI Messungen in den Ordner SHSetup der verwendeten SAMURAI Installation kopiert werden.

Ist die Software installiert, lässt sie sich über die Datei „STI_EXE“ starten. Das Programm öffnet sich und wird sofort ausgeführt. Sollen noch Parameter für die Messung geändert werden, so muss das Programm gestoppt werden.

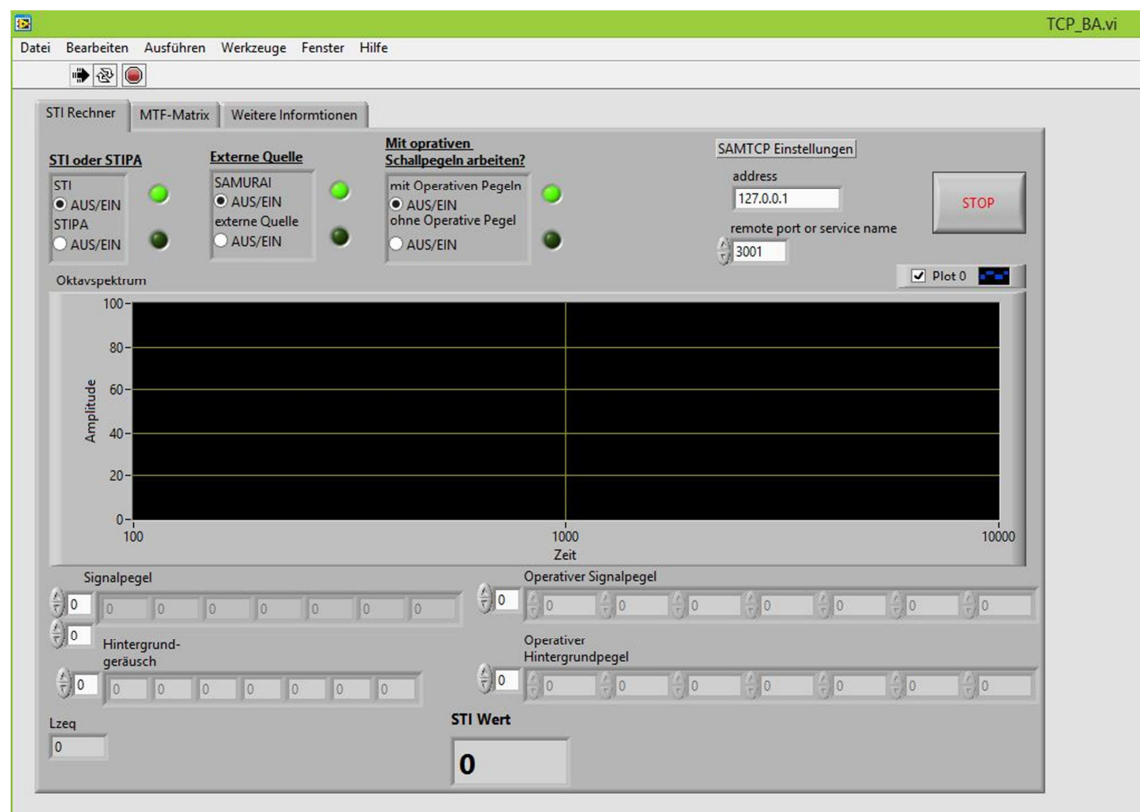
6.1.2 Einstellungsmöglichkeiten des Programms

Die experimentelle Software bietet viele Einstellungsmöglichkeiten. Für eine bessere Übersicht gibt es im Programm drei Registrierkarten. Diese sind „STI Rechner“, „MTF-Matrix“ und „Weitere Informationen“.

In der Registrierkarte „STI-Messung“ werden die Einstellungen für die Messung sowie die Einstellungen für die Verbindung mit SAMURAI über TCP vorgenommen. Um TCP nutzen zu können, muss in den „SAMTCP Einstellungen“ die Netzwerkadresse sowie der „remote port or service name“ eingegeben werden. Die nötigen Informationen finden sich im SAMURAI Handbuch.

Nun besteht die Möglichkeit die Messung einzurichten. Dafür kann man die Entscheidung treffen, ob man den vollen, direkten STI oder den direkten STIPA misst, ob das Prüfsignal von SAMURAI ausgegeben werden soll oder ob es von einer externen Quelle kommen soll und ob man operative Pegel nutzen möchte. Im Bereich „Hintergrundgeräusch“ muss vor einer STI-Messung der Schalldruckpegel des vorher gemessenen Hintergrundgeräusches eingegeben werden. Falls operative Pegel genutzt werden sollen, müssen diese auch vor der Messung eingetragen werden. Das folgende Bild zeigt die Benutzeroberfläche der experimentellen Software:

Abbildung 7: Benutzeroberfläche der experimentellen Software



In der Registrierkarte MTF-Matrix lassen sich die Werte der MTF-Matrix nach einer abgeschlossenen Messung einsehen.

Unter „Weitere Informationen“ befinden sich unter anderem eine Anzeige, welche angibt in welchem Status sich das Programm befindet, welche STI-Messung gerade durchgeführt wird, sowie die Programmierbefehle, welche an SAMURAI gesendet werden und die dazu gehörigen Ausgangswerte.

6.1.3 Ausführen einer STI Messung

Bevor eine Messung gestartet wird, muss SAMURAI ausgeführt werden. Ist dies geschehen, kann über den Pfeil-Button in der oberen linken Ecke die Software gestartet werden. Die Messung wird nun durchgeführt. Ist die Messung und die Berechnung beendet (dies kann einige Sekunden dauern), wird in der Registrierkarte „STI Rechner“ der STI-Wert angegeben.

6.2 Fazit

Das Ziel dieses Bachelorprojektes sollte die Entwicklung, Implementierung und die Validierung einer Software zur Messung von raumakustischen Eigenschaften sein. Diese Eigenschaften sollten vor allem der STI und der STIPA sein, aber auch das Deutlichkeitsmaß und das Klarheitsmaß sollten eine Rolle spielen. Auswertung und Berechnung des STI und STIPA konnten realisiert werden, da jedoch besonders Wert auf die direkte Methode der Messung genommen wurde, konnten die Messung des Deutlichkeitsmaßes und des Klarheitsmaßes nicht verwirklicht werden. Dazu bräuchte man die Impulsantwort. Diese wird jedoch nur bei einer indirekten STI-Messung verwendet.

Bevor mit der Entwicklung der experimentellen Software begonnen werden konnte, musste die DIN Norm durchgearbeitet werden. Vor allem die Erstellung, Messung, Auswertung und Berechnung des Prüfsignals um den STI Wert zu erlangen, waren kompliziert.

Die Entwicklung und Planung der Software wurde zu einem Großteil während der Implementierung vorgenommen, sodass diese beiden Teile simultan abliefen. Während der Implementierung mussten immer wieder Teile der Planung verworfen werden, da sie sich als ineffektiv erwiesen. Als ein Beispiel ist zu nennen, dass zum Beginn jeder Messung ein Fenster geöffnet wird, in welchem die Frage gestellt wird, ob man den STI oder den STIPA messen will. Dieses Fenster wurde durch ein auswählbares Feld in der Benutzeroberfläche ersetzt. Ein weiterer wichtiger Unterschied zur geplanten Software ist die STI Messung. Am Anfang wurde geplant, dass 98 Einzelmessungen durchgeführt werden. Hierfür hätten 98 SAMURAI Setups erstellt werden müssen, die nacheinander von LabView gestartet werden. Es stellte sich jedoch heraus, dass 98 Einzelmessungen ineffektiv und nicht praxistauglich sind. Deswegen wurden sieben Prüfsignale erstellt, welche alle dem STIPA Prüfsignal ähneln. In allen sieben Prüfsignalen sind alle Modulationsfrequenzen für alle Oktavbänder vorhanden. Somit

werden alle 98 Werte für die MTF-Matrix gemessen. Dadurch wird der vollständige, direkte STIPA über sieben STIPA-ähnliche Messungen ermittelt.

Für die Implementierung wurde LabView genutzt. Dies stellte sich als intuitiv bedienbar und leicht erlernbar heraus. Es bietet sowohl für Einsteiger die nötige Einfachheit, um es schnell zu verstehen, als auch für Experten den nötigen Umfang, um komplexe Programme zu erstellen. Wie auch Implementierung und Planung ineinander übergehen, sind auch die Implementierung und Validierung ein fließender Prozess gewesen. Immer wieder wurde die Software getestet, um herauszufinden, ob sie richtig funktioniert. Sobald Fehler bemerkt wurden, konnten sie in LabView umprogrammiert werden. Fehler die unter anderem auftraten waren zum Beispiel, dass nur fünf Sekunden des Prüfsignals ausgewertet wurden, anstatt 15 Sekunden.

Die schlussendlichen Messergebnisse zeigen, dass die Software im Vergleich zum Bedrock SM50 validierbare Werte liefert. Besonders die Messungen mit der dafür entwickelten TalkBox erbrachten hervorragende Ergebnisse. Es stellte sich heraus, dass eine Messung mit dem Geithain Monitor nicht zu empfehlen ist.

Das Ziel des Bachelorprojektes wurde erfüllt. Die Software funktioniert zuverlässig und kann genutzt werden.

Literaturverzeichnis

- [1] <https://das-hoerhaus.de/kinderhoerhaus/infos-fur-kinder/wie-funktioniert-das-ohr/>, 25.07.2017
- [2] Henn, Herman / Sinambari, Gholam Reza / Fallen, Manfred: Ingenieurakustik: Grundlagen Anwendungen Verfahren, 2. Auflage, Braunschweig/ Wiesbaden 1999
- [3] Kalivoda, Manfred T. / Steiner, Johannes W.: Taschenbuch der Angewandten Psychoakustik, Wien/New York 1998
- [4] Müller, Gerhard / Möser, Michael (Hrsg.): Taschenbuch der Technischen Akustik, 3. Auflage, Berlin/Heidelberg 2004
- [5] <http://www.ni.com/labview/d/>, 15.05.2017
- [6] DIN EN 60268-16:2011: Elektroakustische Geräte – Teil 16: Objektive Bewertung der Sprachverständlichkeit durch den Sprachübertragungsindex (IEC 60268-16:2011); Deutsche Fassung EN 60268-16:2011
- [7] <http://www.nti-audio.com/de/messfunktionen/sprachverstaendlichkeit-stipa.aspx>, 15.05.2017
- [8] Speech intelligibility measurements in practice
Obtaining accurate and reliable data using STIPA tools
- [9] <http://www.acoustic-glossary.co.uk/speech.htm>, 17.05.2017
- [10] Barnett, P. W. / Knight, R. D.: The Common Intelligibility Scale - TIB Journal Articles, 1996
- [11] <http://www.studiosixdigital.com/audiotools-modules-2/speaker-test-modules/stipa/>, 17.05.2017
- [12] <https://www.bksv.com/en/products/transducers/acoustic/sound-sources/echo-speech-source-type-4720>, 17.05.2017
- [13] <https://www.bksv.com/en/products/PULSE-analysis-software/acoustic-application-software/building-acoustics/room-acoustic-measurement-dirac>, 17.05.2017
- [14] <http://www.bedrock-audio.com/index.php/bedrock-stipameter>
- [15] DIN 69901-5: Projektmanagement – Projektmanagementsysteme – Teil 5: Begriffe

Anhang A: Tabellarische Übersicht der verschiedenen Messsysteme aus 1.5

Tabelle 18: Vergleich der Vorgestellten Messsysteme aus 1.3

	direkter STI	direkter STIPA	indirekter STI	indirekter STIPA	tragbares Gerät	auf Grund- lage von DIN EN 60268- 16:2011
XL2 STIPA Analysator - NTi-Audio	x	✓	x	x	✓	✓
AudioTools, App - Studio Six Digitalis	x	✓	x	x	✓	✓
Type 7841 DIRAC Room Acoustics Software - Brüel & Kjær	✓	✓	✓	✓	x	✓
Bedrock SM50 STIPA-meter - Embedded Acoustics	✓	✓	x	x	✓	✓

Anhang B: Grenzen des Speech Transmission Index

Da das STI Verfahren nur ein Modellierungsansatz für eine Messung der Sprachverständlichkeit ist, kommt es bei verschiedenen sprachverständlichkeitsrelevanten Änderungen zu fehlerhaften Messungen. Im Folgenden wird auf einige dieser relevanten Veränderungen eingegangen und wie sie sich auf den gemessenen STI auswirken. Die folgenden Punkte sind Zitate der DIN EN 60268-16:2011 [6].

Frequenzverschiebung

„Dies tritt vor allem auf bei: Abspielen eines digitalen Signals mit falscher Abtastrate, Einrichtungen zur Vermeidung einer akustischen Koppelung und Einseitenband-Rundfunkübertragungen. Eine Frequenzverschiebung wirkt sich deutlich auf den gemessenen STI aus. Da bei der normalen Sprachverständlichkeit eine Frequenzverschiebung nicht sehr ins Gewicht fällt, gibt der STI einen nicht zuverlässigen Wert aus.“

Übergangsverzerrung

„Dies kann auftreten wenn Signalteile mit niedrigem Pegel nicht korrekt übertragen werden. In diesen Fällen wird der STI meist zu hoch eingeschätzt.“

Aussetzer

„Sollte es zu Aussetzern kommen, wird der STI im Allgemeinen etwas zu tief eingeschätzt. Bei einer normalen Sprachverständlichkeit haben Aussetzer jedoch eine größere Wirkung. Diese Aussetzer sollten markiert werden um sie in der Nachberechnung gegebenenfalls einzuarbeiten.“

Jitter

„Zeitverschiebungen von Sprache haben keinerlei Auswirkungen auf die Sprachverständlichkeit. Jedoch haben sie eine große Wirkung auf den gemessenen STI. Dieser wird dadurch erheblich herabgesetzt und fällt zu gering aus.“

Vocoder

„Vocoder wirken sich erhöhend auf den STI aus. Auf die Sprachverständlichkeit haben sie jedoch kaum Einfluss.“

Überschätzung des STI bei geringen Hintergrundgeräuschen

„Sollte der Hintergrundgeräuschpegel während Messungen oder Simulationen auf Null gesetzt werden, so fällt der STI zu hoch aus. Dies kommt zustande, da das STI Modell so ausgelegt ist, dass in jedem Oktavband von einer endlichen Sprachrezeptionsschwelle vorausgesetzt ist.“

Frequenzgang

„Es wird davon ausgegangen, dass der Frequenzgang des Übertragungskanal sehr wichtig für die Verständlichkeit ist. Der STI schätzt dies jedoch nicht so hoch ein. Sollte der Frequenzgang nicht annähernd flach sein, so kann es dazu kommen das der STI-Wert zu hoch ist.“

Echos

„Hörbare Echos haben einen deutlichen Einfluss auf die Sprachverständlichkeit. Es hat sich gezeigt, dass der STI Messungen mit deutlich hörbaren Echos höher ausfällt als zu vermuten wäre.“ Die DIN EN 60268-16:2011 empfiehlt andere akustische, diagnostische Maßnahmen zu ergreifen, Echos zu messen.

Schnelle Amplitudenkompression und –expansion

„Es kann zu geänderten STI und STIPA Werten kommen, wenn das Prüfsignal einer Kompression oder Expansion unterzogen wird. Mit angemessenen Kompressionen oder Expansionen werden jedoch nur geringfügige Änderungen der Sprachverständlichkeit festgestellt.“

Nichtlineare Verzerrung

„Besonders auf die indirekte Messweise des STI haben nichtlineare Verzerrungen eine große Auswirkung. Dieses Verfahren berücksichtigt nichtlineare Verzerrungen nicht korrekt und sollte daher nicht angewandt werden. Bei direkten STI Messungen ist das Ergebnis nicht so stark beeinflusst.“

Impulsartige und schwankende Geräusche

„Bei Impulsartigen Geräuschen kann es zu falschen Messungen des STI kommen. Schwankende Geräusche wirken sich vor allem auf wiederholte Messungen aus. Dabei kann es zu erheblichen Unterschieden kommen. Sollten solche Geräusche auftreten, wird empfohlen das indirekte Messverfahren zu verfolgen.“

Schwer hörende Hörer

„Der STI ist kein zuverlässiges Verfahren für schwer hörende Hörer. Es besteht jedoch die Möglichkeit gehörunterstützende Geräte zu messen. Dafür könnten jedoch spezielle Korrekturen erforderlich sein.“

Anhang C: Berechnung des STI

Für die Berechnung des STI müssen viele Korrekturfaktoren berücksichtigt werden. Die bis zu diesem Punkt gemessenen Werte sind der Signalpegel $L_{eq,Signal}$, der Hintergrundgeräuschpegel $L_{eq,Stör}$, sowie die MTF-Werte der Oktavbänder. Die Berechnung von den gemessenen MTF Werten zu dem Einzelwert STI soll im Folgenden beschrieben werden. Die folgenden Rechenschritte wurden der Beispielrechnung der DIN EN 60268-16:2011 in Anhang M nachvollzogen. Als Validierung wurden die Werte für den Signalpegel, den Hintergrundpegel, die MTF-Matrix, den operativen Pegel und den operativen Hintergrundpegel aus Anhang M der Norm in die fertige Berechnungssoftware eingegeben. Das Ergebnis des Programms stimmte mit dem Ergebnis der Norm überein.

1. Signal-Rauschverhältnis während der Messung berechnen

$$L = L_{eq,Signal} - L_{eq,Stör}$$

Diese Werte müssen für jede Oktave ausgerechnet werden.

2. Als nächstes wird der Anteil des Geräusches bestimmt.

$$m_k(f) = \frac{1}{1 + 10^{\left(\frac{-SNR}{10}\right)}} \quad (C.1)$$

SNR ist hierbei der Signal-Rausch-Abstand des empfangenen Prüfsignals im Oktavband k und des Hintergrundgeräusches in Oktavband k .

3. Nun wird die Anpassung zur Entfernung des Hintergrundgeräusches berechnet. Dieser Wert wird aus dem Reziproken der gerade eben berechneten Modulationsübertragungsfunktion gebildet.

$$ANPASSUNGSWERT_{Hintergrund} = \frac{1}{m_k(f)} \quad (C.2)$$

4. Für die weitere Berechnung ist es nötig, den Sprach- und Geräuschpegel energetisch zu addieren.

$$L_{addiert} = 10 \cdot \log \left[10^{\frac{L_{eq,Signal}}{10}} + 10^{\frac{L_{eq,Stör}}{10}} \right] dB \quad (C.3)$$

5. Im Folgenden wird der Hörverdeckungsfaktor amf bestimmt. Dazu wird die folgende Tabelle benötigt:

Tabelle 19: Hörverdeckung als Funktion des Oktavbandpegels [6]

Schalldruckpegel L von Oktavband k-1 in dB	<63	≥63 und <67	≥67 und <100	≥67
Hörverdeckung amdB in dB	0,5 x L - 65	1,8x L–146,9	0,5 x L – 59,8	-10

Die in 4. berechneten Werte für die einzelnen Oktavbänder werden in L aus der oberen Tabelle eingesetzt und der Wert amdB berechnet. Der Hörverdeckungsfaktor berechnet sich dann wie folgt.

$$amf = 10^{\left(\frac{amdB}{10}\right)} \quad (C.4)$$

6. Als nächstes wird der kombinierte, quadrierte Schalldruckpegel bestimmt.

$$I_k = 10^{\left(\frac{L_k}{10}\right)} MPa^2 \quad (C.5)$$

L_k ist hierbei der Schalldruckpegel der einzelnen Oktavbänder.

7. Danach wird der Hörverdeckungsfaktor amf x 1000 berechnet.

$$amfx\ 1000 = amf \cdot 1000 \quad (C.6)$$

8. Im nächsten Schritt wird die Intensität der Verdeckung $I_{am,k}$ bestimmt:

$$I_{am,k} = I_{k-1} \cdot amf \quad (C.7)$$

I_{k-1} ist der bereits berechnete I_k der jeweilig vorhergehenden Oktave.

9. Für den nächsten Schritt wird die absolute Hörschwelle ART bestimmt. Dazu werden die Werte der folgenden Tabelle genutzt:

Tabelle 20: Absolute Sprachrezeptionsschwelle in Oktavbändern [6]

Oktavband in Hz	125	250	500	1000	2000	4000	8000
absolute Sprachrezeptionsschwelle ART als Schalldruckpegel dB SPL	46	27	12	6,5	7,5	8	12

10. Aus diesen Werten wird die Intensität $I_{rt,k}$ der absoluten Sprachrezeptionshörschwelle ermittelt:

$$I_{rt,k} = 10^{\left(\frac{ART_k}{10}\right)} \quad (\text{C.8})$$

ART_k ist die Sprachrezeptionshörschwelle des jeweiligen Oktavbandes.

11. Im nächsten Schritt wird die Anpassung zur Entfernung der Verdeckung und der Sprachschwelle errechnet:

$$ANPASSUNGSWERT_{Schwelle,Verdeckung} = \frac{I_k}{I_k + I_{am,k} + I_{rt,k}} \quad (\text{C.9})$$

12. Jetzt wird die kombinierte Anpassung von Hintergrundgeräusch, Verdeckung und Hörschwelle berechnet:

$$\begin{aligned} \text{Kombinierte Anpassung} &= ANPASSUNGSWERT_{Hintergrund} \cdot \\ &ANPASSUNGSWERT_{Verdeckung,Hörschwelle} \end{aligned} \quad (\text{C.10})$$

Siehe dazu die Werte aus (1.6) und (1.13)

13. Aus diesen Werten wird eine neue angepasste MTF Matrix bestimmt. Dazu wird jeder Wert der vorherigen Matrix mit dem Anpassungswert der jeweiligen Oktave multipliziert.

$$m_{k,angepasst} = m_k \cdot \text{Kombinierte Anpassung} \quad (\text{C.11})$$

14. Für den nächsten Schritt werden die Berechnungen aus 1. – 13. wiederholt. Diesmal werden als Grundlage jedoch der operative Sprachpegel und der operative Hintergrundpegel, anstatt des gemessenen Sprach- und Hintergrundpegels verwendet. Das Ergebnis dieser Berechnungen ist eine neue MTF-Matrix mit den Einzelwerten $m'_{k,fm}$.
15. Aus der neuen MTF-Matrix werden die Signal-Rauschverhältnisse gebildet. Dafür wird folgende Rechnung verwendet:

$$SNR_{eff,k,f} = 10 \cdot \log \frac{m'_{k,fm}}{1 - m'_{k,fm}} \quad (C.42)$$

Alle Werte welche einen Wert von 15 dB überschreiten oder den Wert -15 dB unterschreiten werden auf 15 bzw. -15 dB festgelegt.

16. Aus diesen begrenzten SNR-Werten werden nun die Übertragungsindize $TI_{k,fm}$ bestimmt:

$$TI_{k,fm} = \frac{SNR_{k,fm} + 15}{30} \quad (C.53)$$

17. Nun wird für jedes Oktavband ein MTI berechnet. Es sollten 7 Werte (pro Oktavband einer) herauskommen:

$$MTI_k = \frac{1}{n} \cdot \sum_{m=1}^n TI_{k,fm} \quad (C.14)$$

18. Für die beiden Geschlechter gibt es unterschiedliche Oktavband-Bewertungsfaktoren, die der STI berücksichtigt. Es gibt sowohl die STI-Bewertungsfaktoren α , als auch die Redundanzfaktoren β für männliche und weibliche Sprecher. Die Werte finden sich in folgender Tabelle:

Tabelle 21: Oktavband-Bewertungsfaktoren für männliche und weibliche Sprecher [6]

Oktavband in Hz		125	250	500	1000	2000	4000	8000
männlich	α	0,085	0,127	0,230	0,233	0,309	0,224	0,173
	β	0,085	0,078	0,065	0,011	0,047	0,095	-
weiblich	α	-	0,117	0,223	0,216	0,328	0,250	0,194
	β	-	0,099	0,066	0,062	0,025	0,076	-

Diese Werte werden mit den MTI-Werten multipliziert:

$$MTI_{\alpha,k} = MTI_k \cdot \alpha \quad (C.65)$$

$$MTI_{\beta,k} = MTI_k \cdot \beta \quad (C.16)$$

19. Alle diese neu berechneten Werte werden nun jeweils addiert:

$$MTI_{\alpha} = \sum_{k=1}^7 \alpha_k \cdot MTI_k \quad (C.77)$$

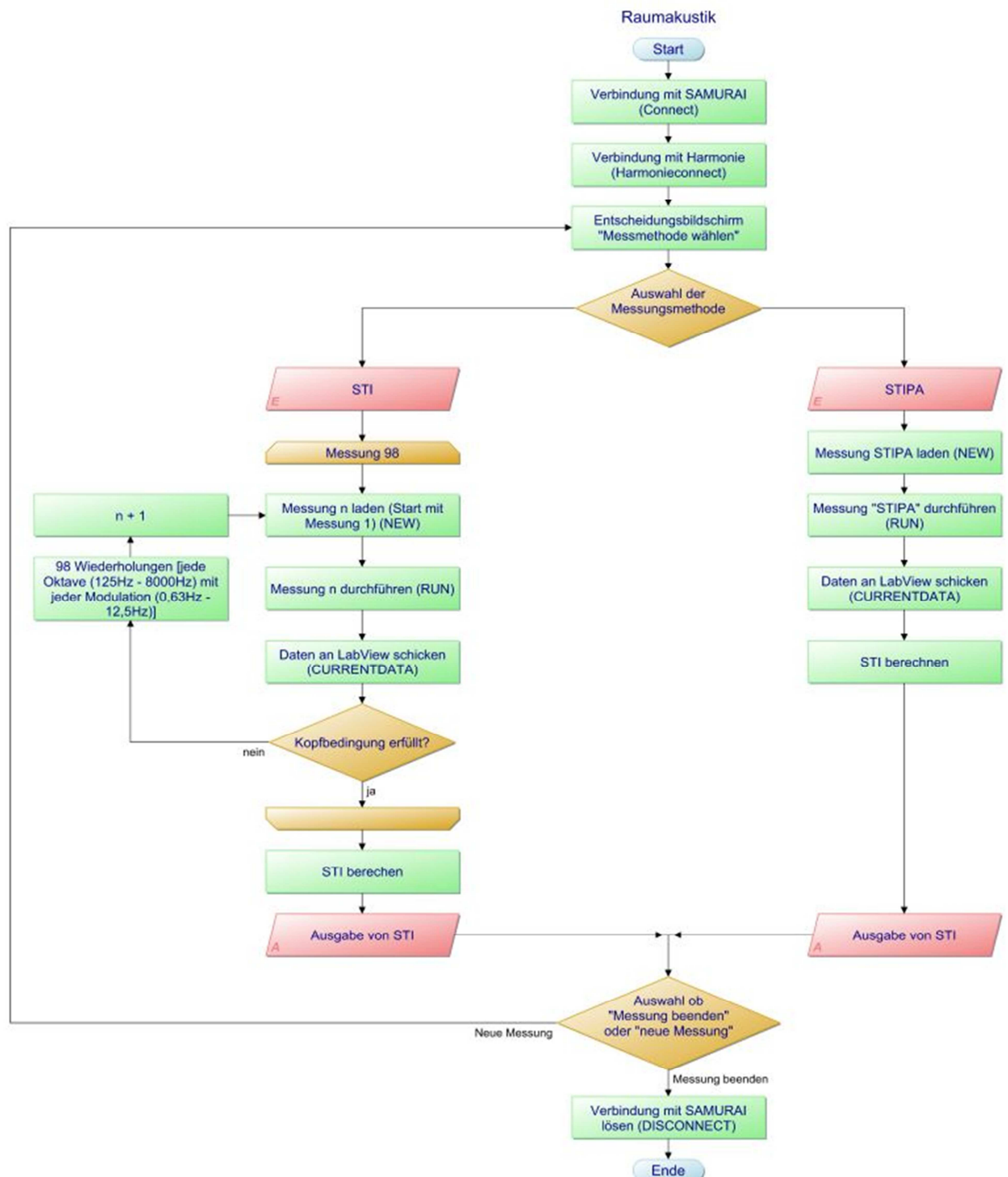
$$MTI_{\beta} = \sum_{k=1}^6 \beta_k \cdot MTI_k = \sum_{k=6}^6 \beta_k \cdot \sqrt{MTI_k \cdot MTI_{k-1}} \quad (C.88)$$

20. Die Differenz der beiden MIT-Werte ergibt dann den endgültigen und angepassten STI:

$$\begin{aligned}
 STI &= \sum_{k=1}^7 \alpha_k \cdot MTI_k - \sum_{k=6}^6 \beta_k \cdot \sqrt{MTI_k \cdot MTI_{k-1}} \\
 &= MTI_{\alpha} - MTI_{\beta}
 \end{aligned} \quad (C.19)$$

Anhang D: Programmablaufplan

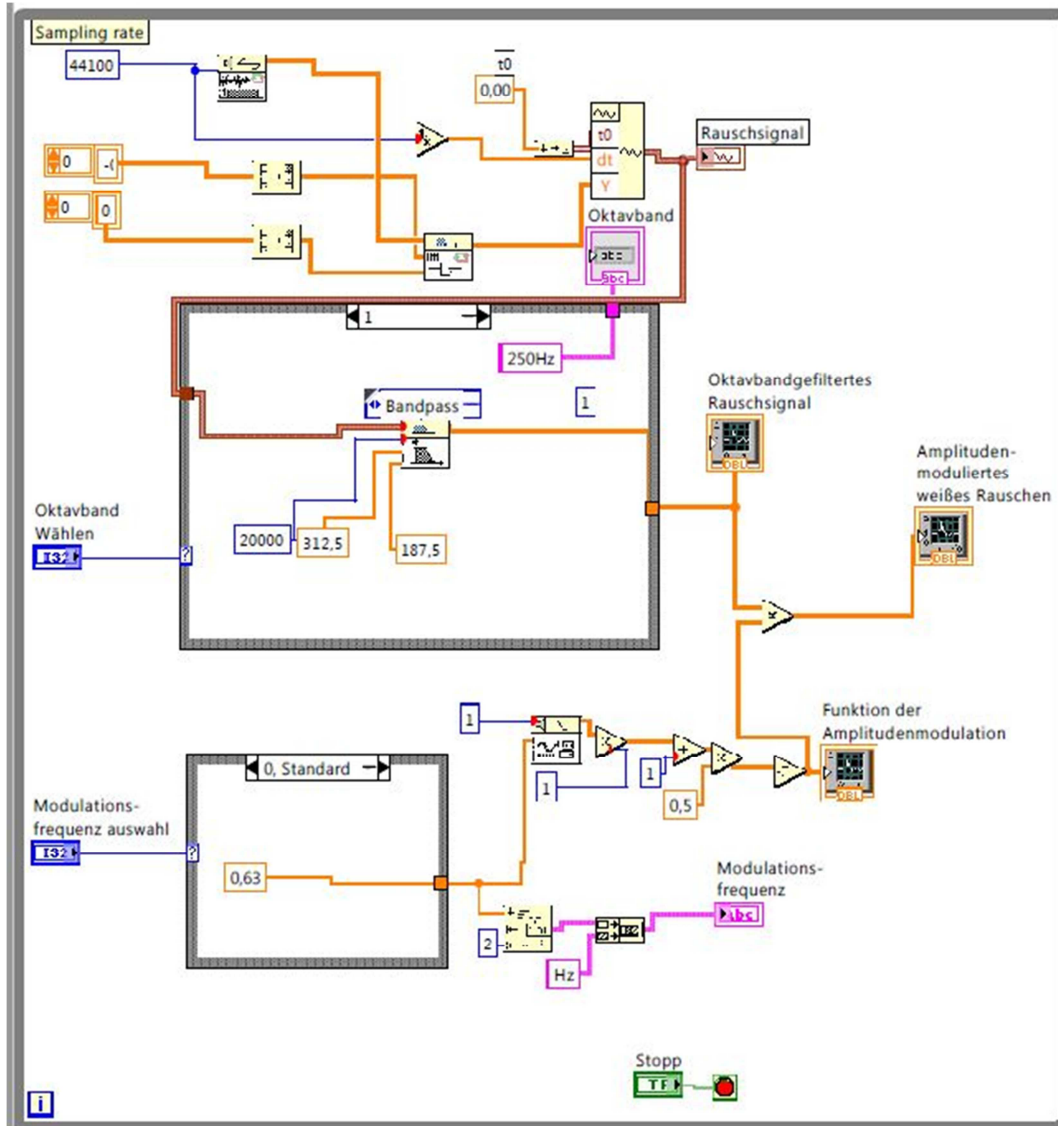
Abbildung 8: Programmablaufplan vor Beginn der Implementierung



Dieser Programmablaufplan zeigt den geplanten Ablauf vor der Implementierung. In Punkt 6.2 wird beschrieben, wie sich dieser Ablauf geändert hat.

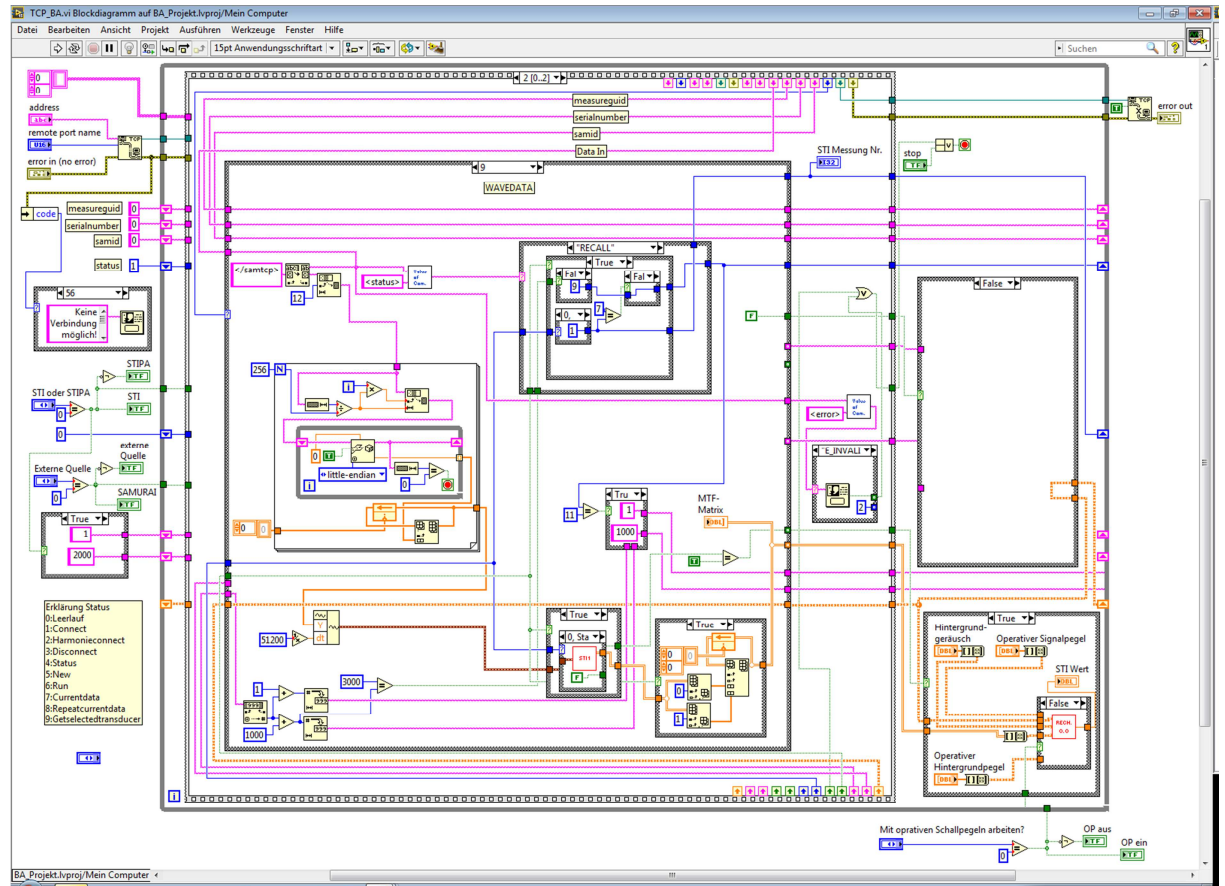
Anhang E: Blockdiagramm zur Erzeugung des Prüfsignals

Abbildung 9: Blockdiagramm zur Erzeugung des Prüfsignals



Anhang F: Blockdiagramm der TCP Verbindung

Abbildung 10: Blockdiagramm der TCP Verbindung



Anhang G: Bilder des Messaufbaus

Messaufbau in der SINUS Messtechnik GmbH

Abbildung 11: Abstand der Messmikrofone



Abbildung 12: Messaufbau mit Geithain Monitor, an Messposition 1

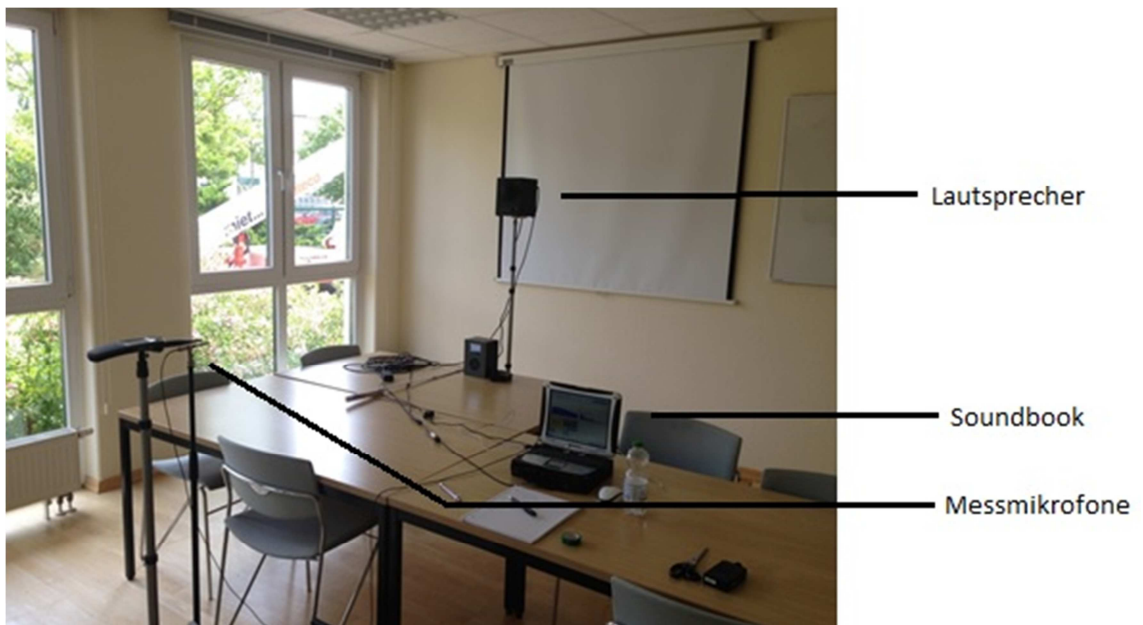
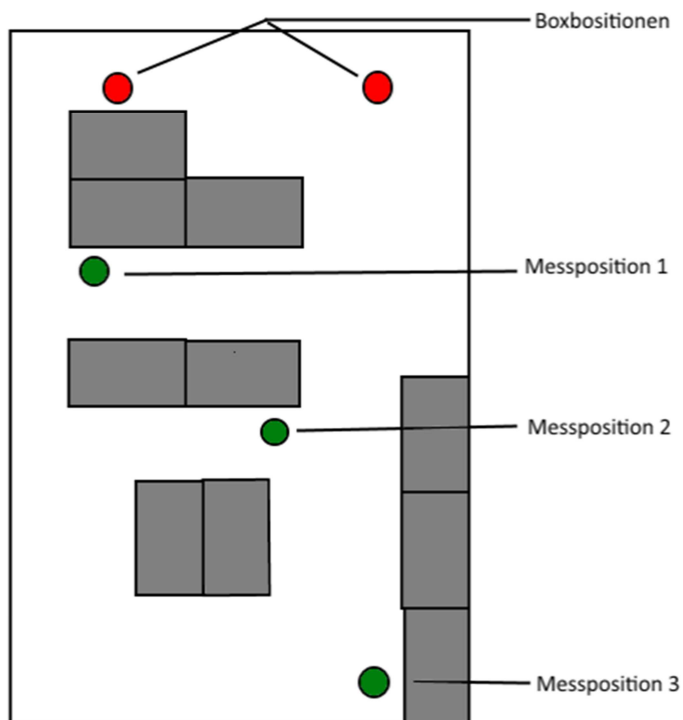


Abbildung 13: Grobe Skizze zum Messaufbau



Messaufbau im Hörsaal N001 der HTWK Leipzig

Abbildung 14: Hörsaal N001 der HTWK Leipzig



Anhang H: Modulationsfrequenzen der STIPA-ähnlichen Messungen

Tabelle 22: Modulationsfrequenzen der ersten STIPA-ähnlichen Messung

Oktavband in Hz	125	250	500	1000	2000	4000	8000
erste Modulationsfrequenz in Hz	1,60	1,00	0,63	2,00	1,25	0,80	2,50
zweite Modulationsfrequenz in Hz	8,00	5,00	3,15	10,0	6,25	4,00	12,5

Tabelle 23: Modulationsfrequenzen der zweiten STIPA-ähnlichen Messung

Oktavband in Hz	125	250	500	1000	2000	4000	8000
erste Modulationsfrequenz in Hz	0,63	2	1,25	0,8	2,5	1,6	1
zweite Modulationsfrequenz in Hz	3,15	10	6,25	4	12,5	8	5

Tabelle 24: Modulationsfrequenzen der dritten STIPA-ähnlichen Messung

Oktavband in Hz	125	250	500	1000	2000	4000	8000
erste Modulationsfrequenz in Hz	0,8	2,5	1,6	1	0,63	2	1,25
zweite Modulationsfrequenz in Hz	4	12,5	8	5	3,15	10	6,25

Tabelle 25: : Modulationsfrequenzen der vierten STIPA-ähnlichen Messung

Oktavband in Hz	125	250	500	1000	2000	4000	8000
erste							
Modulationsfrequenz	2	1,25	0,8	2,5	1,6	1	0,63
in Hz							
zweite							
Modulationsfrequenz	10	6,25	4	12,5	8	5	3,15
in Hz							

Tabelle 26: Modulationsfrequenzen der fünften STIPA-ähnlichen Messung

Oktavband in Hz	125	250	500	1000	2000	4000	8000
erste							
Modulationsfrequenz	1	0,63	2	1,25	0,8	2	1,6
in Hz							
zweite							
Modulationsfrequenz	5	3,15	10	6,25	4	10	8
in Hz							

Tabelle 27: Modulationsfrequenzen der sechsten STIPA-ähnlichen Messung

Oktavband in Hz	125	250	500	1000	2000	4000	8000
erste							
Modulationsfrequenz	2,5	1,6	1	0,63	2	1,25	0,8
in Hz							
zweite							
Modulationsfrequenz	12,5	8	5	3,15	10	6,25	4
in Hz							

Tabelle 28: Modulationsfrequenzen der siebten STIPA-ähnlichen Messung

Oktavband in Hz	125	250	500	1000	2000	4000	8000
erste							
Modulationsfrequenz	1,25	0,8	2,5	1,6	1	0,63	2
in Hz							
zweite							
Modulationsfrequenz	6,25	4	12,5	1,6	1	0,63	10
in Hz							

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe. Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Ort, Datum

Vorname Nachname